



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 8월
박사학위 논문

양성자 빔 이용 미량원소의 정밀분석
응용 연구

조선대학교 대학원
원자력공학과
정철기

양성자 빔 이용 미량원소의 정밀분석 응용 연구

An Application Study on the Analysis of Trace Elements
using Proton Beam

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

정철기

양성자 빔 이용 미량원소의 정밀분석 응용 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

정 철 기

정철기의 박사학위논문을 인준함

위원장	동국대학교 교수	김 유 석
위원	조선대학교 교수	정 운 관
위원	조선대학교 교수	송 종 순
위원	한국원자력의학원 박사	김 근 범
위원	조선대학교 교수	이 경 진



2016년 6월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	i
그림 목차	ii
ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구내용 및 구성	2
제 2 장 이온빔 분석 개요	4
제 1 절 이온빔 분석법의 원리	4
제 2 절 양성자-유도 X-선 방출 (PIXE)	6
1. 물리적 원리	6
2. PIXE 분석을 위한 최적의 조건	8
가. 빔 에너지	8
나. 빔 전류	9

제 3 절	양성자-유도 감마선 방출 (PIGE)	9
제 4 절	PIXE-PIGE 분석 시스템	12
제 3 장	이온빔 분석 시스템 설계 및 제작	14
제 1 절	이온빔 수송계통 설계	14
1.	이온빔 수송계통 설계	14
2.	빔 옵틱스 해석 및 전자석 설계	16
가.	빔 옵틱스 해석	16
나.	빔 전송 시뮬레이션	18
3.	빔 라인 전자석 설계	22
가.	90도 휨용 전자석	23
나.	4극 전자석	28
다.	조절용 전자석	31
라.	빔 라인 전자석 전원공급장치	32
제 2 절	이온빔 분석 시스템 제작 및 설치	33
1.	빔 라인 진공 시스템	33
2.	가속기 및 빔 라인 냉각 시스템	34
3.	이온빔 수송계통 구성품	37
가.	전자석 및 전원공급장치	37
나.	이온빔 에너지 감속장치	38

다. 빔 모니터	45
라. 빔 프로파일 챔버	45
마. 빔 Faraday Cup 챔버	47
바. PIXE-PIGE 챔버	48
사. 빔 평활화 장치	50
아. X-선 및 감마선 검출기	51
4. 이온빔 수송계통 구성품 설치	52
가. 전자석 및 전원공급장치	52
나. 빔 에너지 감속장치	57
다. 빔 모니터	60
라. PIXE-PIGE 빔 조사 시스템	60
마. 이온빔 라인 및 PIXE-PIGE 분석 시스템	61
제 3 절 가속기 및 빔 라인 통합 제어 프로그램 개발	62
1. 가속기 제어 프로그램	62
2. 빔 라인 제어 프로그램	64
가. 전자석 제어 프로그램	64
나. 진공 제어 프로그램	65
다. 표적장치 제어 프로그램	66
3. 가속기 및 빔 라인 통합 제어 시스템	68
제 4 장 이온빔 분석 실험	70
제 1 절 이온빔 인출 실험	70

1. 13 MeV 양성자 빔 인출 실험	70
2. 3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험	74
제 2 절 양성자 방사화 분석(PAA) 실험	76
1. 시료조제(펠릿시료) 및 균질시료 준비	78
2. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 구성비	82
3. 양성자 빔 조사	83
4. 스펙트럼 분석	84
5. 실험결과	85
제 3 절 양성자-유도 X-선 방출 분석(PIXE) 실험	87
1. 시료 준비	87
가. 단일원소 함유 박막시료	87
나. 대한민국 주화 시료	88
다. 암석시료	90
2. 양성자 빔 조사	90
3. PIXE 스펙트럼 분석	94
제 4 절 양성자-유도 감마선 방출 분석(PIGE) 실험	103
1. 시료 준비	105
2. 양성자 빔 조사	105
3. PIGE 스펙트럼 분석	106

제 5 장 결 론 111

참고문헌 114

표 목 차

표 1. PIGE 분석에 사용되는 핵반응.....	10
표 2. 원소의 깊이 프로파일 측정을 위해 사용되는 이온-감마 핵반응 공명.....	12
표 3. 빔 라인 전자석 사양.....	17
표 4. 4극 전자석의 자기장 강도.....	17
표 5. 90도 횡용 전자석의 설계사양 도출결과.....	23
표 6. 빔 라인 전자석 MPS 최종 설계사양.....	32
표 7. 기체형 에너지 감속장치 설계에 사용된 기체의 밀도.....	40
표 8. X-선 검출기 주요 사양.....	51
표 9. 감마선 검출기 주요 사양.....	51
표 10. 90도 횡용 전자석 자장 및 자장효율.....	54
표 11. 에너지에 따른 90도 횡용 전자석 공급전류 계산결과.....	57
표 12. 에너지 감속재용 흑연 박막 사양.....	58
표 13. 13 MeV 양성자 빔 인출 실험결과.....	73
표 14. 에너지 감속재(흑연) 두께에 따른 인출 빔 에너지.....	74
표 15. 3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험결과.....	76
표 16. 빔 라인 구간별 13 MeV 및 3.5 MeV 빔 인출 전류.....	76
표 17. KBSI로부터 지원 받은 1차 시료.....	77
표 18. KBSI로부터 지원 받은 2차 시료.....	77
표 19. 펠릿 시스템 사양.....	78
표 20. 암석시료별 셀룰로즈 혼합비율.....	81
표 21. 양성자 방사화 분석용 빔 조사 데이터.....	83
표 22. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비 계산결과.....	86
표 23. PIXE 분석용 단일원소 함유 박막시료의 성분 함유량.....	88
표 24. PIXE 분석용 주화의 성분 함유량.....	89
표 25. 방사선 분석에 유용한 X-선 에너지.....	95
표 26. PIGE 분석 시료의 빔 조사량 데이터.....	106

그림 목 차

그림 1. 양성자 입사에 의한 특성 X-선 발생원리	5
그림 2. 표적 원자에 따른 에너지별 PIXE 수율변화	7
그림 3. 구리 표적에 대한 PIXE와 SEM-EDX 스펙트럼 비교	8
그림 4. PIGE 스펙트럼	11
그림 5. 조선대학교 PIXE-PIGE 분석시스템 개요도	13
그림 6. 사이클로트론의 양성자 빔 수송 궤적	15
그림 7. 빔 옵틱스 해석용 전자석 배치	16
그림 8. 빔 옵틱스 시뮬레이션 결과	18
그림 9. 에너지 감속장치와 2개의 collimator를 순서대로 설치한 경우 빔 전송 시뮬레이션 결과	19
그림 10. 에너지 감속장치를 90도 횡용 전자석 입구에 설치한 경우 빔 전송 시뮬레이션 결과	20
그림 11. 에너지 감속장치와 Collimator를 제거한 시뮬레이션 결과	20
그림 12. 운동량 퍼짐에 따른 빔 크기 변화분석결과	21
그림 13. 빔 수송단 전자석 구성	22
그림 14. 13 MeV 빔의 회전반경 시뮬레이션 결과	24
그림 15. 90도 횡용 전자석 회전반경 계산결과	25
그림 16. 90도 횡용 전자석 상세 설계도	26
그림 17. OPERA-3D 프로그램을 이용한 90도 횡용 전자석의 3차원 입체영상	26
그림 18. 90도 횡용 전자석의 field strength	27
그림 19. 13 MeV 양성자에 대한 90도 횡용 전자석의 자기장 분포	27
그림 20. 2중 4극 전자석의 상세 설계도면	29
그림 21. 3중 4극 전자석의 상세 설계도면	29
그림 22. 4극 전자석의 field strength	30
그림 23. 4극 전자석에 대한 빔 tracking 계산 결과	30
그림 24. 4극 전자석의 2차원 자기장 분포해석 결과	31
그림 25. PIXE-PIGE 분석용 빔 라인의 진공 시스템	34
그림 26. 기존의 사이클로트론 냉각장치의 구성 및 역할	35

그림 27.	냉각수 온도변화에 따른 빔 전류 변화.....	35
그림 28.	성능개선 후 냉각장치.....	36
그림 29.	냉각장치의 냉각성능 비교.....	37
그림 30.	GEANT-4 코드에 입력될 기체 에너지 가변장치 구조도.....	39
그림 31.	GEANT-4 코드를 이용한 시뮬레이션 결과.....	40
그림 32.	헬륨을 이용한 에너지 감쇄 결과.....	41
그림 33.	GEANT-4 전산모사를 위한 기하학적 배치.....	42
그림 34.	흑연의 13 MeV 양성자 침투 깊이(GEANT-4).....	43
그림 35.	흑연 두께에 따른 인출 에너지 [0.8mm(좌) / 0.9mm(우)].....	43
그림 36.	고체형 에너지 감속장치 입체 설계도면.....	44
그림 37.	고체형 에너지 감속장치 제작도면.....	44
그림 38.	빔 전류 측정 장치 설계 입체도면.....	45
그림 39.	빔 프로파일 챔버 설계도면.....	46
그림 40.	빔 라인 Faraday Cup 챔버 설계도면.....	47
그림 41.	PIXE-PIGE 챔버 설계도면.....	48
그림 42.	이온빔 수송계통 구성품 설치.....	53
그림 43.	90도 횡용 전자석 효율분석 결과.....	54
그림 44.	빔 라인 인출 빔의 에너지에 따른 입력전류.....	57
그림 45.	흑연 박막 두께별 90도 횡용 전자석의 자장 전류 측정결과.....	59
그림 46.	90도 횡용 전자석 자장 전류에 따른 빔 에너지 측정결과.....	59
그림 47.	다중 while 루프를 이용한 프로그램 구조.....	62
그림 48.	마스터와 슬레이브 패턴 구조를 이용한 프로그램 구조.....	63
그림 49.	가속기 제어 프로그램.....	64
그림 50.	전자석 제어 프로그램.....	65
그림 51.	진공 제어 프로그램.....	66
그림 52.	표적장치 제어 프로그램.....	67
그림 53.	가속기 및 빔 라인 통합 제어 시스템.....	68
그림 54.	13 MeV 양성자 빔 인출 실험 배치도.....	71
그림 55.	90도 횡용 전자석 자장전류와 빔 전류 측정결과.....	72
그림 56.	3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험 배치도.....	75
그림 57.	펠렛 시스템.....	79

그림 58.	시료의 펠릿화 과정	80
그림 59.	펠릿으로 제조된 암석시료	80
그림 60.	SRM-987 암석 표준시료	81
그림 61.	스트론튬 함량이 높은 2차 시료	82
그림 62.	빔 조사를 위하여 표적장치에 장착된 시료	83
그림 63.	양성자 방사화에 의한 암석 표준시료의 감마선 스펙트럼	84
그림 64.	SRM-987 시료의 이트륨 감마선 피크(좌: ^{87}Y , 우: ^{86}Y)	85
그림 65.	VDT2 시료의 이트륨 감마선 피크(좌: ^{87}Y , 우: ^{86}Y)	85
그림 66.	PIXE 분석용 단일원소 박막 시료	87
그림 67.	지지대에 장착된 박막 시료	88
그림 68.	PIXE 분석용 주화 시료	89
그림 69.	빔 조사용 표적장치 지지대에 장착된 주화 시료	89
그림 70.	빔 조사용 표적장치 지지대에 장착된 암석시료	90
그림 71.	Ti 시료의 조사 빔 전류	91
그림 72.	Al 시료의 조사 빔 전류	91
그림 73.	Mo 시료의 조사 빔 전류	92
그림 74.	SUS 시료의 조사 빔 전류	92
그림 75.	땀납 시료의 조사 빔 전류	93
그림 76.	실리콘 고무 시료의 조사 빔 전류	93
그림 77.	3.5 MeV 양성자 빔 조사 흔적이 있는 암석시료	94
그림 78.	Al 시료의 PIXE 스펙트럼	96
그림 79.	Ti 시료와 Mo 시료의 PIXE 스펙트럼	97
그림 80.	Ti 시료의 PIXE 스펙트럼	97
그림 81.	10원 주화의 PIXE 스펙트럼	98
그림 82.	50원 주화의 PIXE 스펙트럼	98
그림 83.	100원 주화의 PIXE 스펙트럼	99
그림 84.	SRM-987 암석 표준시료의 PIXE 스펙트럼	100
그림 85.	땀납 시료의 PIXE 스펙트럼	101
그림 86.	실리콘 시료의 PIXE 스펙트럼	102
그림 87.	J15-236 암석시료의 PIXE 스펙트럼	102
그림 88.	J15-237 암석시료의 PIXE 스펙트럼	103

그림 89. 알루미늄과 실리콘 원자핵의 여기 준위	104
그림 90. Ti 시료의 PIGE 스펙트럼	107
그림 91. 10원 주화의 PIGE 스펙트럼	107
그림 92. 100원 주화의 PIGE 스펙트럼	108
그림 93. Al 시료의 PIGE 스펙트럼	109
그림 94. 실리콘 고무 시료의 PIGE 스펙트럼	109
그림 95. 알루미늄 시료의 PIXE 스펙트럼 및 PIGE 스펙트럼 비교	110
그림 96. 실리콘 시료의 PIXE 스펙트럼 및 PIGE 스펙트럼 비교	110

ABSTRACT

An Application Study on the Analysis of Trace Elements using Proton Beam

Jeong, Cheol - ki

Advisor : Prof. Lee, Goung-Jin, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

The purpose of the research is that design an appropriate proton extraction beam line to enhance KIRAMS-13 utilization. Using the beam line, a PIXE-PIGE analysis system would be developed to ensure the ion beam analysis technology. Also, using government supported research facilities, the utilization plan of public experiment device and human resource plan should be established.

In general, a proton beam is used for PIXE and PIGE analysis to measure an abundance of atoms. The proton beam, which has an appropriate energy, could be generated based on large accelerator facilities. Currently, the electrostatic accelerators, such as a tandem and Van De Graaff generator, are widely used on ion beam research fields.

The PIXE-PIGE analysis are using the x-ray or gamma-ray which are generated based on the interactions between the proton beam and the target material. It could be determined the content of atoms or abundance based on non-destructive method. Therefore, the system is required the high technology of design and analysis. Also, it is difficult to built a PIXE-PIGE analysis system in ordinary laboratory, because the cost of the proton beam generator is expensive.

In this paper, the cyclotron, which is developed by Korea Institute of

Radiological And Medical Science(KIRAMS) and called KIRAMS-13, would be applied the ion beam analysis. The KIRAMS-13 could generate 13 MeV of proton beam, which can be used on the ion beam analysis also other proton beam application fields. So, the proton beam utilization facilities using the KIRAMS-13 should be established.

In general, the cyclotron generated proton beams are diverged. In case of medical cyclotron, the beam divergence helps to produce radioisotopes.

At this study, to deliver the proton beam until the PIXE-PIGE analysis chamber, which is located at the end of the beam line from the cyclotron, an effective beam transport line was designed. Also, the various components of the beam line were designed such as magnets, power supplies, beam current control chambers, faraday-cups, PIXE-PIGE analysis chambers, and detectors.

The beam line components were manufactured and installed based on the design of PIXE-PIGE analysis system. The total 10 magnets and power supplies, such as bending, doublet quadrupole, triplet quadrupole and steering, were manufactured and installed.

A beam current control chamber was manufactured to stop and manipulate beam current. The chamber was improved to install a vacuum device. In addition, the previous cyclotron control program problems were fixed. For the appropriate beam line control, a LabVIEW based control program was developed for the magnet, power supply, and the target control.

The beam line optimization studies were performed based on the sub-projects. At the first sub-project, a control program was developed for magnets, vacuum device, and the PIXE-PIGE target. Using the developed program, the sectional beam extraction experiments were performed. At the second sub-project, the optimal beam extraction parameters were obtained by measuring the extracted beam emittance.

The beam extraction experiments were performed based on the optimization study

of the beam line. During the beam extraction, the beam shape and current were measured by each section. The experimental results show that about 40% of extracted 13 MeV proton beam from the cyclotron was delivered until PIXE-PIGE analysis chamber. In case of 3 ~ 5 MeV proton, which would be used in PIXE-PIGE analysis, about 0.02% of proton was delivered. Most of the extracted beam were lost by the energy degrader and bending magnet. Based on the beam extraction experiments, the cyclotron operation parameter and beam line parameter were obtained.

At this study, various ion beam experiments were performed. The first experiment was the proton activation analysis(PAA), which is using 13 MeV proton without energy degradation. The second experiment was PIXE analysis and PIGE analysis, which is using degraded proton beam, which has 3.5 MeV energy range. At the PAA experiment, the abundance of stable strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) was measured. The PAA results shows the accuracy as $96.2 \pm 3.8\%$ compared with TIMS analysis result. This results shows that PAA could be applied on the abundance measurement of rock.

For the PIXE and PIGE analysis, various materials were exposed by 3.5 MeV proton beam. The measurements of characteristic X-ray and gamma-ray after the proton irradiation are interesting experiments. At this experiment, the reaction rates of proton exposure were measured. The result shows that PIXE and PIGE analysis should be linked each other.

Through this study, the cyclotron based beam line components design technology was obtained. The major components for this kind of beam transport line were magnets, power supply, vacuum, PIXE-PIGE analysis chamber, faraday cup, and beam monitors. Also, the beam conditions from the cyclotron were ensured from the 13 MeV and 3.5 MeV proton transport beam line study. Through this study, the beam line optics design technology was obtained.

The developed control program, which was based on the previous cyclotron

control program concept, can control the beam line magnet and PIXE-PIGE target. The patent using the developed program is pending. Also, the established PIXE-PIGE analysis system can be contributed to production of outstanding research results.

The established PIXE-PIGE analysis system is a typical device on the determining the element make-up of a sample. The system is definitively necessary on the archeology. Also, the medical cyclotron generates high enough proton beam, which can be successfully applied on PIXE-PIGE analysis and basic science fields using nuclear reactions. Therefore, the PIXE-PIGE analysis system can be utilized various fields such as archeology. Also, many educational programs using proton beam can be developed and used to train the next generation on physics and nuclear engineering fields.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

러더포드 후방산란 분광법(RBS) 및 핵반응 분석(NRA)과 같은 이온빔분석 기술은 1957년에 입자 가속기에 의해서 탄생하였다. 그런 다음 1960년대 초에는 반도체 검출기의 개발에 의해 대부분의 이온빔분석 분야가 빠르게 확대되었으며, 이온빔분석에 완전히 전념하는 입자 가속기가 전 세계적으로 건설되었다. 1970년에는 입자-유도 X선 방출(PIXE)이라는 이름으로 명명된 또 다른 분석방법이 개발되었으며, 1972년에는 이러한 새로운 도구의 고유기능 즉, 그 중 가장 중요한 비파괴성 때문에 미술사 및 고고학에 대한 응용이 시작되면서 빠르게 성장하였다. 이에 따라 1973년과 1977년에는 각각 이온빔분석과 PIXE 라는 새로운 분야에 대한 국제회의가 개최되기에 이르렀다. 1985년에는 프랑스에서 그 주제에 대해 국제 워크숍이 특별히 개최되기도 하였다. 1987년 말 이 워크숍의 결론은 루브르 박물관에 위치한 이온빔 시설의 설계와 건축을 이끌었으며, 그 후 입자 가속기 시설은 지속적인 문화유산 연구에 공헌하였다[1].

이온빔분석에 주로 사용되는 가속기가 Van de Graaff 와 Tandem 과 같은 정전형 가속기이다. 이러한 정전형 가속기는 다양한 종류의 이온들을 가속할 수 있고, 특히 가속된 이온빔의 질, 즉 에너지 및 전류의 안정도와 Emittance 가 다른 기종의 가속기들보다 뛰어나, 지금까지 핵물리 연구 분야, 핵 분광학이나 중이온 핵반응 연구에 필수적인 장비로 사용되어 왔다. 현재에는 중이온과 편극 이온가속, 고속중성자 생성과 아울러 응용분야인 PIXE 분석법에 의한 미량원소 분석, 이온주입, Microprobe 법에 의한 표면원소 분석 등 다양한 분야에 사용되고 있으며, 이러한 목적을 위하여 점점 고전압, 대전류형 입자 가속기가 요구되고 있는 추세이다[2].

본 논문에서는 이온빔분석에 주로 사용하는 정전형 가속기가 아닌 고주파를 이용한 교류형 가속기인 사이클로트론을 이용하여 PIXE(Proton-Induced X-ray Emission) 와 PIGE(Proton-Induced Gamma-ray Emission) 분석 시스템을 구축하였다. 본 연구에 사용된 가속기는 국산 가속기로 KIRAMS-13 사이클로트론이다. 사이클로트론은 1931년 로렌스가 발명한 원형 입자 가속기 중 하나이며, 고주파 전기장과 고정 자기장을 이용해 입자를 가속시킨다. 현재 전 세계적으로 방사성동위원소 생산용으로 쓰이는 10 ~ 30

MeV 급 사이클로트론이 가장 많이 보급되고 있으며, 국내의 경우, PET의 보급과 더불어 10 MeV 에너지 대역의 사이클로트론이 주로 보급되어 있다[3].

PIXE 및 PIGE 분석은 양성자 빔과 표적물질과의 반응에서 발생하는 엑스선과 감마선을 측정하여 시료 내의 미량원소 함유량이나 원소 함량비 등을 분석하는 초정밀 비파괴 분석시스템이다. 양성자를 이용한 PIXE 및 PIGE 분석 시스템은 의료(개발된 암 진단 시약 내 불순물 함유량 측정), 환경(대기분진, 하천수질 분석), 원산지 추적(농축산업, 고고학, 예술품 등), 지질 및 자원분석 등으로 다양하기 때문에 산업적으로 활용가치가 높은 시설이다.

따라서 의료용 사이클로트론을 이용한 이온빔분석 시설을 구축하는 사례는 세계적으로도 드문 일이므로 가속기 시설을 이용하는 국가 연구시설 구축 측면에서 매우 의미 있는 연구일 것이다.

제 2 절 연구내용 및 구성

2001년 한국원자력의학원에 의해 13 MeV 급 의료용 사이클로트론의 국산화 성공 이후 전국 7개 권역에 국산 사이클로트론인 KIRAMS-13 이 설치되어 운영되고 있다. 막대한 정부 예산이 투입된 국산 사이클로트론은 현재 각 권역에서 의료용 동위원소 생산목적으로 주로 사용되고 있다. 고가의 사이클로트론은 의료용 단반감기 방사성동위원소 생산뿐만 아니라 입자 빔을 이용하는 학문분야로의 활용가치도 상당히 크다. 그러나 입자 빔 이용시설을 갖추기 위해서는 많은 비용과 인력이 소요되므로 일반 연구기관에서 쉽게 보유할 수 없는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 고가의 연구 장비인 사이클로트론을 의료적 이용뿐만 아니라 입자 빔 응용연구 목적에 사용할 수 있도록 조선대학교 사이클로트론 시설에 빔 라인을 설계·제작하였으며, 사이클로트론에서 인출되는 13 MeV 양성자 빔의 에너지를 조절하여 PIXE 및 PIGE 분석, 그리고 PAA(Proton Activation Analysis) 분석에 활용하는 실험을 수행하였다.

본 논문의 구성과 각 장의 연구범위 및 내용은 다음과 같다. 제 2장에서는 입자 가속기를 이용한 이온빔분석법과 PIXE-PIGE 분석 시스템의 관한 기본 이론을 설명하였다. 제 3장에서는 사이클로트론으로부터 PIXE-PIGE 분석 챔버까지 양성자 빔 수송 궤적과 빔 라인 진공장치, 그리고 냉각장치 등에 대한 가속기 계통 설계와 빔 라인을 구성하

는 각각의 구성품에 대한 빔 라인 계통설계, 그리고 PIXE-PIGE 분석 챔버 및 방사선 검출기와 같은 표적계통 설계 등 PIXE-PIGE 분석 시스템의 종합적인 설계내용과 제작 및 설치에 따른 실험 내용을 설명하였다. 제 4장에서는 구축된 빔 라인 시스템을 이용한 실제 이온빔 분석 실험내용 등을 기술하였다. 이온빔 분석실험 내용으로는 13 MeV 양성자를 이용한 양성자 방사화 분석(PAA)과 3.5 MeV 양성자를 이용한 PIXE 분석 및 PI GE 분석 등이 포함된다. 마지막으로 제 5장에서는 연구결과에 대해 기술하였다.

제 2 장 이온빔 분석 개요

정전형 가속기는 1930년대 초에 설계된 하전입자 가속기의 첫 번째 형태이다. 이러한 가속기는 원래부터 핵물리학 분야에 전용되었다. 그러나 핵물리학자의 더 높은 에너지에 대한 지속적인 요구 때문에 정전형 가속기는 점진적으로 사용되지 않았다. 이러한 정전형 가속기들의 가용성은 곧 재료의 처리 및 분석에 대한 잠재적인 도구로 고체 물리학 및 재료 과학자들의 관심을 끌었다. 이온빔분석(IBA)라고 불리는 분석기술의 새로운 세트는 빠르게 성장하였고, 광범위하게 다양한 과학 분야에서 적용되었다. 1957년에는 러더포드 후방산란 분광법(RBS) 및 핵반응 분석(NRA)과 같은 두 이온빔분석 기술이 탄생하였다. 그런 다음 1960년대 초에는 반도체 검출기의 개발에 의해 대부분의 이온빔분석 분야가 빠르게 확대되었으며, 이온빔분석에 완전히 전념하는 가속기가 전 세계적으로 건설되었다. 1970년에는 입자의 유도에 의한 X선 방출(PIXE)이라는 이름으로 또 다른 분석방법이 개발되었으며, 1973년에 이온빔분석과 PIXE라는 새로운 분야에 대한 국제회의는 곧 개최되었다. 1972년에는 이러한 새로운 도구의 고유기능 즉, 그 중 가장 중요한 비파괴성 때문에 미술사 및 고고학에 대한 응용이 시작되었으며, 빠르게 성장하였다. 1985년에는 프랑스에서 그 주제에 대해 국제 워크숍이 특별히 개최되었다. 1987년 말 이 워크숍의 결론은 루브르 박물관에 위치한 이온빔 시설의 설계와 건축을 이끌었으며, 문화유산 연구에 공헌하였다. 이 역사적 배경에 대한 자세한 내용은 여러 리뷰 기사에서 찾을 수 있다[1].

이온빔 분석 기술은 재료의 구성 원자와 MeV 범위 에너지의 가벼운 이온들과의 상호작용에 의존하며, 광자 또는 이온과 표적 원자의 에너지 특성을 가질 수 있는 2차 생성물의 검출에 의존한다[1].

제 1 절 이온빔 분석법의 원리

이온빔 분석법으로 표적 성분의 확인은 항상 시료에서 방출되는 방사선의 에너지 측정에 의존한다. 여기에서 시료는 하전입자나 광자와 같은 입자로 충격하는 대상 시료이다. 하전입자와 광자는 시료 물질과의 상호작용 시 고유의 특성을 나타낸다는 점에

유익하는 것이 중요하다. 광자가 시료를 침투하는 동안 광자의 개수는 감소하고, 에너지는 변하지 않는다. 그에 반하여, 하전입자의 수는 일정하게 유지된다. 그들의 에너지는 완전히 멈출 때까지 점차적으로 감소된다. 이것은 광자와 하전입자에 기초한 이온빔 분석 기술의 능력에 대한 극적인 결과이다. 원자에서 방출된 광자는 그들이 생산된 깊이에 대한 정보를 갖지 않기 때문에, PIXE 또는 PIGE와 같은 광자에 기초한 방법들은 부족한 프로파일링 능력을 갖는다. 그러므로 PIXE 및 PIGE 분석은 대량분석이 바람직하고, 많은 원소를 동시에 측정할 수 있다는 장점을 갖는다[1].

본 절에서는 완전히 비파괴적이고 미량원소 분석 연구에 완벽하게 적용하기 위해 사용되고 있는 이온빔 분석법 중 PIXE 분석법과 PIGE 분석법에 대한 원리를 기술하였다. 여기에서 제시한 PIXE 분석 방법이나 분석에 사용되는 빔 전류의 조건은 빔 라인 구축을 위한 PIXE-PIGE 분석 시스템의 설계기준이 되었다. 이를 이용하여 PIXE-PIGE 분석 시스템의 종합설계를 수행하였다.

이온빔 분석법에는 PIXE 및 PIGE 분석법뿐만 아니라 다양한 분석법들이 존재한다.

- 양성자-유도 X선 방출 (PIXE)
- 양성자-유도 감마선 방출 (PIGE)
- 러더포드 후방산란 분광법 (RBS)
- 탄성 반동 검출 분석 (ERDA)
- 핵반응분석 (NRA)

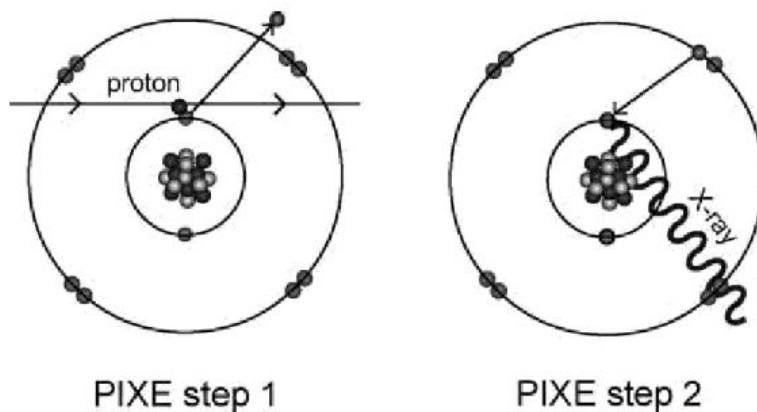


그림 1. 양성자 입사에 의한 특성 X-선 발생원리 (출처 : Ref. [1])

그림 1은 입자-유도 X-선 방출(PIXE)의 경우로, 2단계에 걸친 반응을 나타내는 그림으로 양성자가 표적원자와 반응하여 방출하는 특성 X-선 방출원리를 설명한다. 양성자가 입사하는 최초(1단계)에는 표적 원자의 내부껍질의 전자는 입사되는 양성자에 의해 방출된다. 그런 다음(2단계) X선 방출에 의해 전자 재배열이 수반된다[1].

입자-유도 감마선 방출(PIGE) 경우에도 X-선 발생 원리와 비슷하지만, 표적 원자의 내부 핵이 입사하는 양성자에 의해 여기(1단계)되고 여기된 에너지만큼 원자핵으로부터 감마선이 방출(2단계)된다. 그런 다음 핵은 다시 기저상태로 되돌아간다[1].

제 2 절 양성자-유도 X-선 방출 (PIXE)

PIXE 분석법은 문화유산 분야에서 지금까지 가장 많이 사용되는 이온빔 분석 기술이다. 이런 이유로는 다른 방법에 의한 것보다 보다 더 상세한 해석이 가능하기 때문이다. PIXE 분석법특징들의 대부분은 다른 X-선 방출 기술과 공통적이다.

1. 물리적 원리

PIXE는 (1) 입사 이온에 의해 표적원자의 내각 전자의 이온화, (2) 외곽 전자에 의해 이온화 된 전자 공석의 충전과 특성 X-선 방출에 의한 과잉 에너지 방출이라는 두 단계의 과정을 거친다. 방출된 X-선의 에너지 E 는 물질의 원자번호와 관련된 다음의 식과 같다[1]. (모즐리 법칙)

$$E = C(Z - s)^2$$

여기서 C 는 각각의 스펙트럼 시리즈에 대한 차 상수이며, s 는 1에 가까운 차폐 상수이다. X-선 생성률은 충돌하는 입자의 에너지와 표적 원자의 원자번호에 의존한다. 그림 2에서는 빔의 에너지를 증가시켰을 경우 각각의 Na, Si, Cu, Ba 원자에 대한 X-선 수율을 나타낸다. 그러나 빔의 에너지를 고정시키는 경우, X-선 수율은 표적 원자의 원자번호가 커질수록 가파르게 감소한다[1].

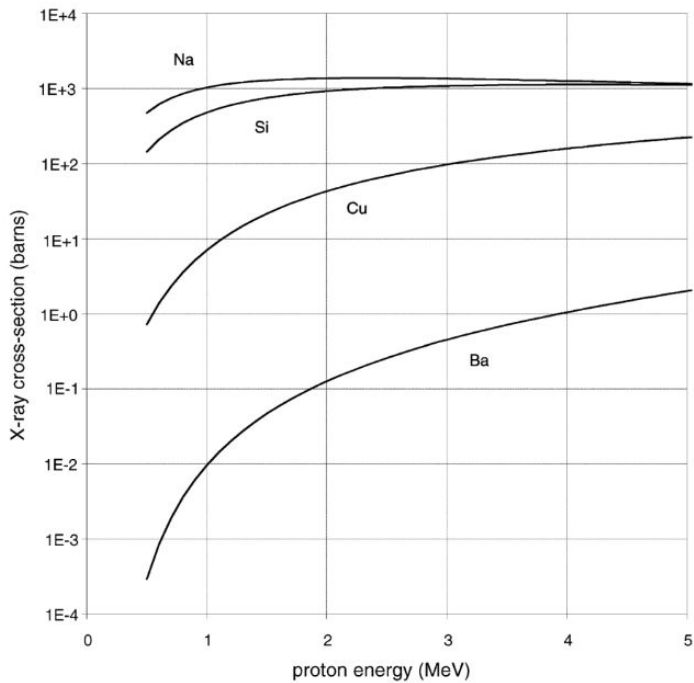


그림 2. 표적 원자에 따른 에너지별 PIXE 수율변화 (출처 : Ref. [1])

전형적인 PIXE 실험에서 입사입자는 2 ~ 3 MeV 에너지를 갖는 양성자를 사용한다. 입사된 양성자에 의해 생성된 X-선은 리튬이 주입된 실리콘 고체 검출기에 의해 검출된다. 이런 검출기들에 의해 검출 가능한 가장 낮은 에너지는 1 keV 정도이며, 원자번호가 11보다 큰 원소에 대해서는 K각 X-선 뿐만 아니라 L각 X-선까지 동시에 측정할 수 있다. 이 기술은 매우 민감하고 측정이 매우 빠르다(수 분). 그리고 전자 마이크로 프로브 방식에 비해 백그라운드가 매우 낮다. 왜냐하면, 전자에 의한 것보다 양성자에 의해 발생하는 제동복사선이 매우 작기 때문이다. 따라서 1 ~ 10 ppm 정도의 낮은 검출한계로 민감도를 향상시킨다. 이러한 특성이 PIXE 분석을 미량원소 분석에 적합하도록 만든다. 그러나 두꺼운 시료에 대한 정량분석은 복잡한 매트릭스 효과 때문에 쉬운 일이 아니다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 소프트웨어 패키지가 개발되었다. 그 중 GUPIX 프로그램은 가장 널리 이용되고 있는 프로그램이다. GUPIX 프로그램은 5% 이상의 정확도로 시료 성분을 정량할 수 있다[1].

그림 3은 구리 표적에 대한 PIXE와 SEM-EDX 스펙트럼을 비교한 그림이다. PIXE 스펙트럼을 얻기 위하여 입사 입자는 3 MeV의 양성자를 이용하였으며, SEM-EDX 스펙트럼을 얻기 위하여 20 keV의 전자를 이용하였다. 양성자에 의해 발생하는 제동복사선이 훨씬 작기 때문에 PIXE 스펙트럼의 백그라운드가 현저하게 낮은 것을 알 수 있다[1].

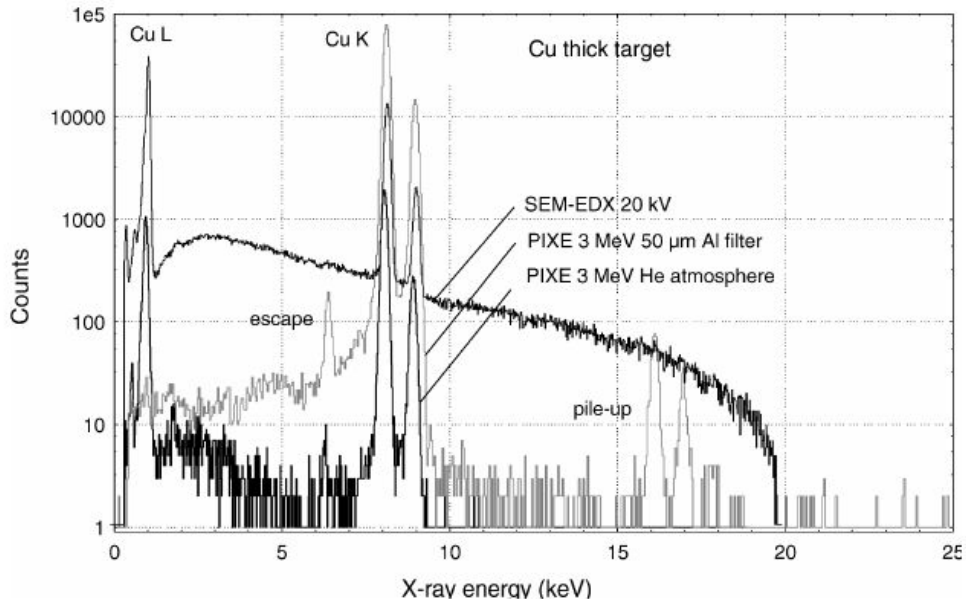


그림 3. 구리 표적에 대한 PIXE와 SEM-EDX 스펙트럼 비교 (출처 : Ref. [1])

2. PIXE 분석을 위한 최적의 조건

가. 빔 에너지

PIXE 분석에 대한 최고의 감광도는 통상적으로 3 MeV 양성자 빔을 가지고 얻어진다. 3 MeV 이하의 에너지에서는 무거운 원소의 검출이 방해된다. 빔 에너지를 1 MeV 감소시키면 중간 정도의 원자번호를 갖는 원소에 대한 X-선 수율은 10배 정도 감소한다. 반대로 3 MeV를 초과하는 에너지를 갖는 빔을 이용하는 것 또한 해롭다. 콤프턴 효과에 의해 가벼운 원소로부터 높은 감마선 발생이 야기되어 X-선 스펙트럼에서 평평한

백그라운드는 작은 피크들을 모호하게 만들고, 이에 따라 PIXE 모드에서의 감도를 감소시킨다. 더욱이 3 MeV 이상의 에너지는 2차 전자의 제동복사로 인해 백그라운드를 6 keV 이상으로 확장시키므로 철보다 무거운 원소의 감도를 방해한다[1].

PIXE 분석에서 빔 에너지가 미치는 영향을 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 그림 3은 다양한 표적 원자에 대해 에너지에 따른 X-선 반응단면적(PIXE 수율)을 나타낸다. X-선 반응단면적은 빔의 에너지에 따라 연속적이고 부드럽게 증가한다. 빔의 에너지를 고정시키고 보면 표적의 원자번호가 증가할수록 X-선 반응단면적은 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다[1].

나. 빔 전류

PIXE 분석에서 사용되는 빔 전류는 일반적으로 0.1~10 nA 범위 내이며, 시료의 성분과 검출기의 배열에 의존한다. 이러한 조건 하에서 시료위에 충전된 전류는 0.3~30 mW 정도로 낮으며, 이것은 PIXE 기술에 있어서 비파괴성의 기본적인 기원이다. 초기 PIXE 실험은 2단계로 수행되곤 했다. 첫 번째는 낮은 원자번호의 원소로 구성된 매트릭스는 검출기 창 앞에 흡수체 없이 1 MeV 양성자를 측정하였다. 미량 수준에 존재하는 높은 원자번호를 갖는 원소들은 검출기 크리스탈에 도달하는 후방산란 입자를 방지하고 매트릭스 원소로부터 X-선을 흡수하기 위한 역할을 하는 적절한 필터를 장착하고, 3 MeV 양성자 빔으로 분석하였다(예, 50 μ m 알루미늄). 시료의 방사선량을 감소시키고 실험 속도를 높이기 위하여, 주요 성분과 미량원소에서 X-선을 방출하는 단일 실험의 기록은 흥미롭다. 하나의 가능성은 Funny Filter라고 하는 가는 구멍이 뚫린 필터를 사용하는 것이다. 그 구멍은 주요 원소의 X-선에 대한 감소된 고체각을 제공하기 때문이다[1].

제 3 절 양성자-유도 감마선 방출 (PIGE)

PIXE 분석에서 사용된 동일한 3 MeV 양성자 빔을 가지고 PIGE 분석에서는 리튬, 베릴륨, 붕소, 염소 등의 분석이 용이하다. 이것은 이러한 특정 원소들의 높은 감마선 생성수율 때문이다. 표 1은 양성자와 중양성자를 이용하여 가벼운 원소의 대량 분석을 위해 선택된 비 공명 반응을 PIGE 에 사용한 것이다[1].

생성된 감마선의 수는 X-선의 수보다 여전히 낮지만 이것은 훨씬 더 높은 체적과 감마선 검출기의 고체각도가 개선된 검출 효율에 의해 보완할 수 있다[1].

표 1. PIGE 분석에 사용되는 핵반응

Element	Reaction	E_{γ} (keV)	Yield/ $\mu\text{C}/\text{Sr}$	Application
3.5 MeV protons				
Lithium	${}^7\text{Li}(p, p' \gamma){}^7\text{Li}$	478	9×10^6	Emeralds
Beryllium	${}^9\text{Be}(p, \alpha \gamma){}^6\text{Li}$	3562	2.5×10^6	Emeralds
Fluorine	${}^{19}\text{F}(p, p' \gamma){}^{19}\text{F}$	197	3×10^6	Bone
Sodium	${}^{23}\text{Na}(p, p' \gamma){}^{23}\text{Na}$	439	9.6×10^6	Glass
Silicon	${}^{28}\text{Si}(p, p' \gamma){}^{28}\text{Si}$	1779	1.2×10^6	Glass
Copper	${}^{28}\text{Cu}(p, p' \gamma){}^{28}\text{Cu}$	152	2.3×10^6	Bronze, gold
Silver	${}^{28}\text{Ag}(p, p' \gamma){}^{28}\text{Ag}$	309	1.1×10^5	Gold
Gold	${}^{28}\text{Au}(p, p' \gamma){}^{28}\text{Au}$	279	6×10^4	Gold
1.8 MeV deuterons				
Carbon	${}^{12}\text{C}(d, p \gamma){}^{13}\text{C}$	3089	1.5×10^7	Copper alloys
Nitrogen	${}^{14}\text{N}(d, p \gamma){}^{15}\text{N}$	7301	1.2×10^7	Copper alloys
Oxygen	${}^{16}\text{O}(d, p \gamma){}^{17}\text{O}$	871	1.1×10^7	Copper alloys
Sulphur	${}^{32}\text{S}(d, p \gamma){}^{33}\text{S}$	841	2.4×10^5	Copper and gold alloys

출처 : Ref. [1]

감마선은 에너지 분해능이 좋은 고순도 게르마늄 검출기에 의해서 측정되거나 높은 에너지의 감마선에 대해 좋은 효율이 요구될 때에는 NaI 또는 bismuth germanate crystal 이 사용된다[1].

그림 4는 PIXE 분석에 사용된 동일한 3 MeV 양성자 빔을 PIGE 분석에 사용한 예로서, Li, Be, B, F 등의 원소 정보를 확인할 수 있는 스펙트럼이다. 강한 피크 왼쪽으로 컴프턴 엣지가 확인되며, 전자 쌍생성 과정에 의한 Be 피크에 대한 escape 피크도 확인된다[1]. 이상적인 조건하에서, PIXE 및 PIGE 채널에서의 계수율은 동일한 수준으로 얻을 수 있고, 각각의 스펙트럼은 동일한 실험에서 수집된다. 나트륨, 알루미늄, 실리

콘과 같은 원소들은 PIXE 와 PIGE 에 의해 모두 측정될 수 있다. 왜냐하면 감마선은 시료 내에서 감쇄되지 않기 때문이다. PIGE 신호는 PIXE 신호보다 훨씬 더 깊은 곳으로부터 나온다. 산소, 탄소, 질소와 같은 원소는 낮은 생성수율 때문에 3 MeV 양성자 빔을 이용하면 거의 검출되지 않는다. 그러나 이런 가벼운 원소들에 대해 강한 PIGE 방출을 생산하는 중양성자 빔을 이용하면 극복할 수 있다[1].

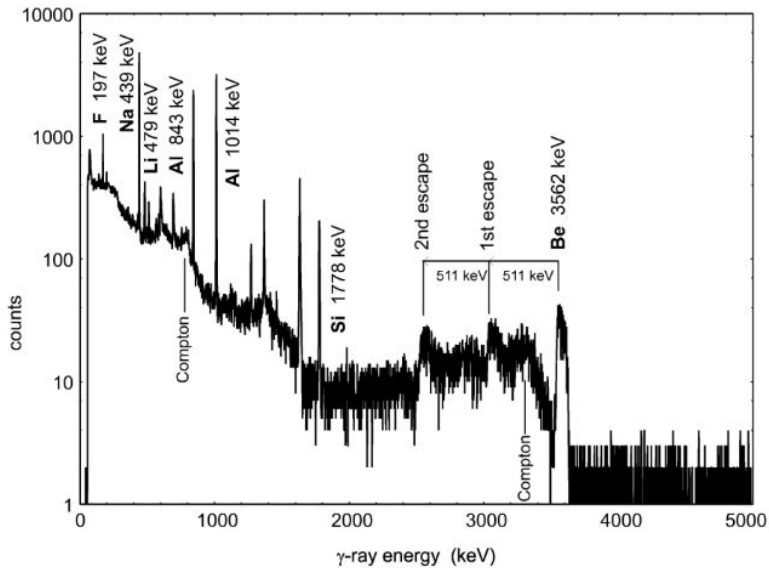


그림 4. PIGE 스펙트럼 (출처 : Ref. [1])

불행이도 중양성자 조사 후 시료는 방사화 될 수 있고, (d,n) 반응에 의해 생성되는 중성자 플럭스는 시설에 대한 약간의 방사선 차폐가 필요하다. 아울러 빔 조사에 따른 반응으로 인해 검출기, 비디오카메라와 같은 전기장치의 손상이 초래될 수도 있다 [1]. 일부 이온-감마 반응은 특별한 에너지 값에서 날카로운 공명을 나타낼 수 있으며, 그런 특징은 빔 에너지를 단계적으로 증가시키는 방식으로 원소의 깊이 프로파일을 결정하는데 유용하게 적용될 수 있다[1].

표 2는 어떤 원소에 대해 깊이 프로파일 결정을 위해 사용된 공명 이온-감마 핵반응을 나타낸 것이다. E_r 는 공명 에너지, E_γ 는 γ -선 방출 에너지, ΔR 은 시료 표면에서의 깊이 분해능, R 은 실리카 매트릭스내의 최대 침투깊이를 각각 나타낸다[1].

표 2. 원소의 깊이 프로파일 측정을 위해 사용되는 이온-감마 핵반응 공명

Element	Reaction	E_r (MeV)	E_γ (MeV)	ΔR (μm)	R (μm)	Applications
H	$^1H(^{15}N, \alpha\gamma)^{12}C$	6.385	3.385	0.004	2-3	Quartz, obsidian dating
H	$^1H(^{19}F, \alpha\gamma)^{16}O$	16.2	16.2	0.08		Glass weathering
F	$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	0.872	0.872	0.1	1.4	Flint dating
Na	$^{23}Na(p, \alpha\gamma)^{20}Ne$	1.01	1.01	0.1	0.5	Glass weathering
S	$^{32}S(p, p'\gamma)^{32}S$	3.094	3.094			Bronze patina

출처 : Ref. [1]

제 4 절 PIXE-PIGE 분석 시스템

1970년대에 이룩된 Si(Li) 또는 HPGe 검출기 등 반도체 검출기의 급속한 성능개선에 힘입어 입자가속기에 의해 가속된 수 MeV급의 하전입자로 인하여 방출된 X-선을 정확하게 검출할 수 있게 되면서 PIXE-PIGE 분석법은 기술적으로 크게 발전할 수 있었다. 또한 그 응용분야에 대한 확대 및 신기술의 도입의 노력이 지속적으로 이루어져 왔다. PIXE-PIGE 분석법의 특징으로는 다중원소 동시분석 가능성, 고감도, 미량시료요소, 신속분석, 비파괴분석 및 절대측정가능 그리고 대기 중에서의 분석 가능성 등을 들 수 있다. 물론 위와 같은 바람직한 면 외에 PIXE-PIGE 분석법의 대중화에 영향을 주는 부정적인 측면도 내재해 있다. 첫째로는 우선 MeV 급 입자가속기를 사용할 수 있어야 한다는 점에서 장치비용이 고가이며, 장치운전, 유지보수의 전문기술인력이 요구된다는 점을 들 수 있다. 둘째로는 아직 PIXE-PIGE 분석 장비는 상업적으로 판매되고 있지 않으므로 PIXE-PIGE 분석을 원하는 실험자 스스로 표적함 및 계측계를 설계해야 하므로 전문성이 상당히 요구된다는 점이다. PIXE-PIGE 분석의 결과는 일반 여타 분석법과 마찬가지로 분석에 요구되는 제반단계, 즉 표준화작업, 이온빔 조사, 시료준비, 오염 제거, 스펙트럼 분석, matrix 효과 보정 등에 따라 좌우된다. 따라서 분석결과의 정확도를 보장하며 검출한도를 낮추기 위해서는 실험장치 구성, 운전, 시료처리, 결과검정

과정에서 위의 제반사항에 관계되는 최적조건을 적용해야 한다[4].

조선대학교 사이클로트론 연구센터는 2003년도 정부의 권역별 사이클로트론 연구소를 유치하여 의료용 13 MeV 국산 사이클로트론(KIRAMS-13)이 설치되어 있다. 현재 설치된 KIRAMS-13 사이클로트론은 암 진단용 방사성의약품 제조에 활발히 이용되고 있다. 조선대학교에 설치되어 있는 KIRAMS-13 사이클로트론 시설은 외국산 동위원소 생산용 사이클로트론 설치와는 달리 사용자에 의해 빔 라인 확장을 고려하여 설계되어 있어 동위원소 생산뿐만 아니라 이온빔을 이용한 다양한 실험을 수행할 수 있도록 시설이 구축되어 있다.

그림 5는 본 논문에서 설계한 PIXE-PIGE 분석시스템의 개요를 나타낸다. 시스템은 양성자 빔이 시료에 입사하는 입사각과 45° 각도로 좌우측에 X-선 검출기와 감마선 검출기를 각각 설치하여 PIXE 분석과 PIKE 분석을 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

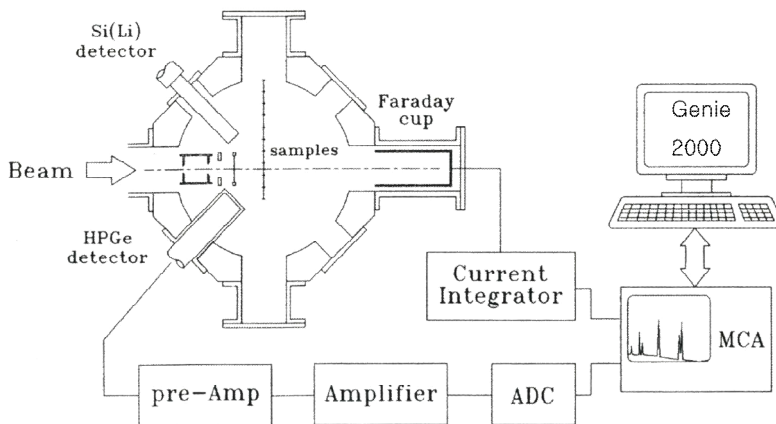


그림 5. 조선대학교 PIXE-PIGE 분석시스템 개요도

제 3 장 이온빔 분석 시스템 설계 및 제작

본 장에서는 KIRAMS-13 사이클로트론을 이용하여 PIXE-PIGE 분석을 위해, 반드시 필요한 설비의 종합적인 설계 사항 및 제작내용을 기술하였다. PIXE-PIGE 분석 시스템 설계 및 제작은 크게 2단계로 이루어진다. 가장 우선적으로 수행되어야 할 사항이 빔 라인 설계이다. 그리고 빔 라인 설계를 기초로 각각의 컴포넌트들에 대한 설계 및 제작이 이루어진다.

이온빔 라인 설계에는 사이클로트론으로부터 PIXE-PIGE 챔버 까지의 수송계적 및 이에 따른 빔 옵틱스 계산을 수행하고, 이 결과를 이용하여 빔 라인 전자석 및 전자석 전원공급장치 설계가 이루어져야 한다. 그 후 이온빔 라인 설계 자료를 이용하여 빔 라인에 설치되는 각각의 컴포넌트 설계 및 제작이 수행된다. 이온빔 분석 빔 라인의 컴포넌트에는 전자석, 전원공급장치, 진공시스템, 냉각시스템, 에너지 감속장치, 빔 모니터, 빔 프로파일 챔버, 빔 라인 Faraday Cup, PIXE-PIGE 챔버 등이 포함된다. 이들 각각의 계통에 대한 상세설계 내용은 각 절에서 자세히 기술하였다.

제 1 절 이온빔 수송계통 설계

1. 이온빔 수송계적 설계

PIXE-PIGE 분석 시스템은 방사선 측정 시스템으로 방사선의 백그라운드 준위가 높은 가속기와 동일한 장소에 설치할 수 없다. 따라서 PIXE-PIGE 분석을 위해서는 가속기와 분리되어 독립된 분석실이 필요하며, 가속기로부터 PIXE-PIGE 분석실까지의 전용 빔 라인을 설치가 필요하다. 이와 같은 빔 라인을 설계하기 위한 기본적인 조건이 빔 수송계적 설계이다.

빔 수송계적 설계 시 중요하게 고려된 사항으로는 사이클로트론에서 인출된 양성자 빔의 에너지를 변경할 수 있도록 설계하는 것이다. 빔의 에너지를 변경하기 위해서 흔히 사용하는 것이 분석용 전자석이다. 분석용 전자석은 2극 전자석의 형태이며, 사용자가 원하는 각도에 맞게 휨 각도를 설계할 수 있다. 본 연구에 사용된 분석용 전자석

의 휨 각도는 90° 이다. 분석용 전자석을 이용하여 빔의 에너지를 선별하는 원리는 전자석의 자기장 세기와 빔의 회전반경과의 관계로부터 유도된다.

그림 6은 사이클로트론에서 인출된 빔이 PIXE-PIGE 분석실까지 수송되는 수송궤적 설계도이다. 사이클로트론에서 인출된 13 MeV 양성자 빔은 분석용 전자석에 의해서 인출 방향에 대해 수직으로 방향전환이 이루어지며, 방향전환 이후에는 집속용 전자석을 통해서 PIXE-PIGE 분석실까지 전송된다. 빔의 에너지 변환은 사이클로트론과 분석용 전자석 사이에 설치된 에너지 감속장치에 의해 이루어진다.

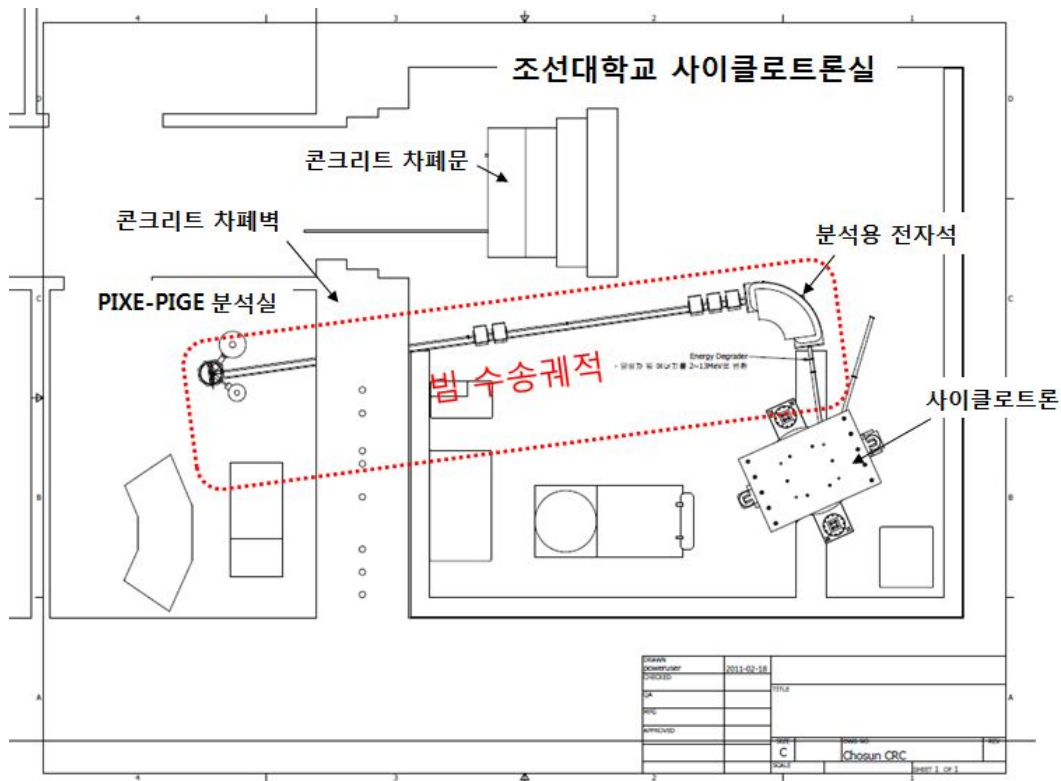


그림 6. 사이클로트론의 양성자 빔 수송 궤적

최적의 빔 수송을 위하여 사이클로트론의 빔 인출 포트로부터 실험실까지 3 가지의 구성요소에 대한 매개변수를 조합하여 빔 수송 궤적을 설계하였다. 첫 번째 구성요소가 에너지 감속장치 이다. 사이클로트론에서 인출된 13 MeV 양성자 빔을 PIXE 및 PIGE 분석에 적합한 에너지 즉, 3 ~ 5 MeV 로 감속시키기 위해서는 반드시 필요한 구성요소

이다. 두 번째 구성요소는 90도 휨용 전자석이다. 에너지 가속장치를 통과한 빔은 다양한 에너지 분포를 가지므로 에너지 선별을 위한 조치가 필요하다. 이러한 목적으로 사용되는 것이 90도 휨용 전자석이다. 마지막으로 빔 수송에 반드시 있어야 할 구성요소인 4극 전자석이다. 에너지 가속장치와 90도 휨용 전자석을 통과한 빔이 PIXE 및 PIGE 분석용 챔버가 위치한 실험실까지 최대한 많이 도달할 수 있도록 빔 집속을 위한 4극 전자석 배치는 필수적이다. 4극 전자석은 빔 옵틱스의 설계에 따라 2중 또는 3중 집속을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 구성요소들에 대한 매개변수를 조절하여 최적의 빔 수송계적 설계를 그림 6과 같이 완성하였다.

2. 빔 옵틱스 해석 및 전자석 설계

가. 빔 옵틱스 해석

빔 옵틱스 해석을 위해 사용된 13 MeV 양성자 빔의 초기조건인 빔 에미턴스 값은 반경과 수직방향에 대해 각각 $29 \pi \text{ mm mrad}$ 와 $6 \pi \text{ mm mrad}$ 를 사용하였다.[5] 빔 옵틱스 계산을 위한 빔 라인 전자석의 배치는 설계된 빔 수송계적에 따라 그림 7과 같다. 빔 옵틱스 해석에 사용된 프로그램은 Win agile[6]을 사용하였다. 빔 라인의 세부적인 구성은 사이클로트론으로부터 빔 인출 방향으로 1,800 mm 떨어진 곳에 90도 휨용 전자석을 배치하고, 90도 휨용 전자석으로부터 760 mm 에 2중 4극 전자석을 설치하였다. 그리고 2중 4극 전자석의 두 번째 magnet 으로부터 1,050 mm 떨어진 곳에 3중 4극 전자석을 배치하고 빔 옵틱스 계산을 수행하였다.

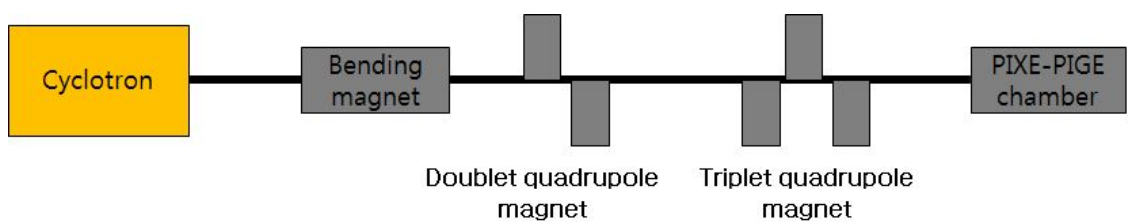


그림 7. 빔 옵틱스 해석용 전자석 배치

이와 같은 방법으로 13 MeV 양성자를 90도 횡용 전자석에 통과시켜 PIXE-PIGE 챔버 방향으로 방향을 전환시킬 경우, 이를 통과한 빔은 많이 퍼지게 된다. 따라서 이 퍼진 빔은 2중 4극 전자석으로 1차 집속을 하고, 3중 4극 전자석을 이용하여 PIXE-PIGE 챔버 위치에서 빔의 크기가 가장 최소가 될 수 있도록 2차 집속을 하였다.

4극 전자석 설계는 자기장 포화에 의한 요크에서 자기장 왜곡을 감소시키기 위하여 최대 자기장을 0.1 Tesla로 설정하였다.

앞서 언급했듯이 90도 횡용 전자석 과 2중, 3중 4극 전자석은 Win agile 프로그램으로 빔 옵틱스 계산을 통해 설계되고 제작되었다. 시뮬레이션 작업에 사용된 전자석에 사양은 표 3과 같으며, 4극 전자석 에 대한 자기장 강도 데이터는 표 4에 나타나 있다. 그림 8은 각각의 전자석을 이용하여 빔 옵틱스 계산에 적용한 결과를 보여준다. 그림 8에서 보면 Betatron function에서 수평과 수직방향에서 최종 노즐에서 집속되고 있음을 확인하였다.

표 3. 빔 라인 전자석 사양

Elements	Description
90° 90도 횡용 전자석	Radius of rotation : 750 mm Magnetic Force : 0.7 Tesla Height of Gap : 65 mm
4극 전자석	Max. Magnetic Force at Pole tip : 0.1 Tesla Length of Magnet : 300 mm Distance of pole : 65 mm

표 4. 4극 전자석의 자기장 강도

Elements	Description	Intensity
2중 4극 전자석	Q1	5.98/m ²
	Q2	-4.79/m ²
	Q3	-0.19/m ²
3중 4극 전자석	Q4	6.00/m ²
	Q5	-4.08/m ²

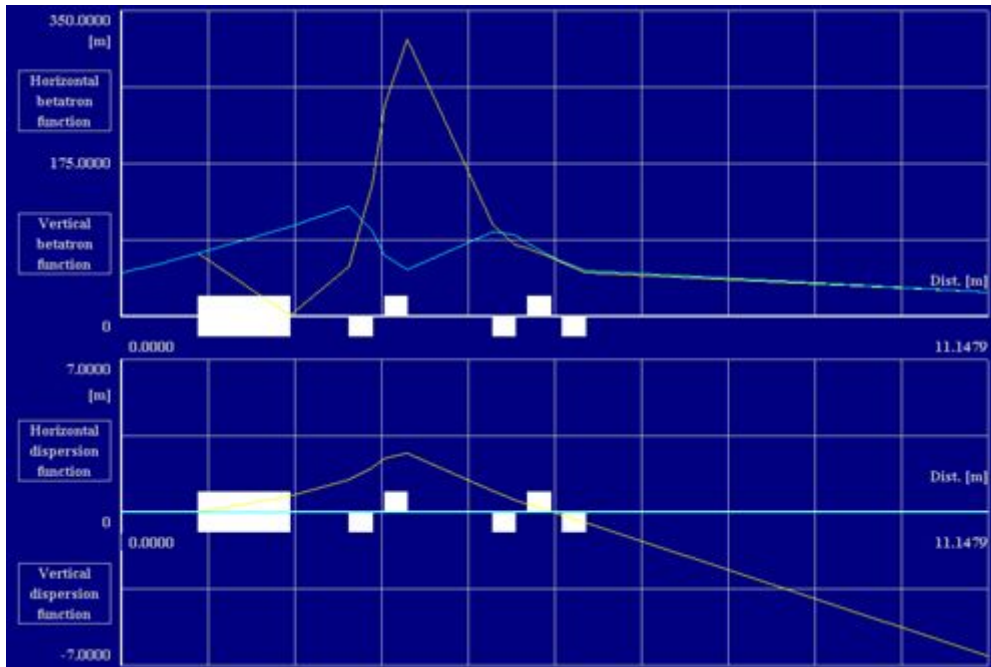


그림 8. 빔 옵틱스 시뮬레이션 결과

추가적으로 사이클로트론에서 인출된 빔은 이후에 에너지 가속장치와 10 cm 간격의 quadrant 두개를 넣으면, 빔의 크기를 2 mm 이내로 평활화 할 수 있는 것으로 계산되었으며, 이때의 빔 전류는 1/25 로 감소되는 것으로 계산되었다. 아울러 조절용 전자석은 일반적으로 4극 전자석 앞에 설치하는 것이 바람직한데, 이 경우는 3중 4극 전자석 과 최종 PIXE-PIGE 챔버 앞에 설치하는 것이 보다 효과적인 것으로 계산되었다. 빔 크기가 파이프보다 크게 된 부분은 quadrant를 두어 빔 크기를 제어할 수 있도록 설계하였다[7].

나. 빔 전송 시뮬레이션

계산된 빔 옵틱스 결과를 이용하여 빔 전송 효율을 계산하기 위해 전산 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 GEANT 4 프로그램이다[8]. 빔 전송 시뮬레이션은 PIXE 분석에 사용할 3 MeV 양성자 빔의 전송 효율을 계산하는 것이 목적이

다. 90도 횡용 전자석 전단에 흑연 박막을 설치하여 13 MeV 양성자를 3 MeV 대역으로 감소시켜 90도 횡용 전자석에 입사시키고, 90도 방향 전환 및 PIXE-PIGE 챔버까지 빔의 전송 효율을 계산하여야 하므로, 빔 전송 효율 계산 시뮬레이션을 수행하기 전에 에너지 감속장치에 의한 빔의 운동량 퍼짐을 계산하여야 한다.

0.915 mm 두께의 흑연을 사용하는 경우, 13 MeV 양성자의 에너지를 3 MeV 로 감소시키면 발생하는 빔의 운동량 퍼짐(RMS)은 ~ 4.5% 정도로 계산되었다. 알루미늄 포일의 경우에도 결과는 ~ 4% 수준으로 크게 다르지 않았다.

계산된 운동량 퍼짐 결과를 입력한 후 빔 전송 시뮬레이션 결과, 10,000개의 입자 중 단 1개의 입자만이 노즐에 도착하여 0.01%의 생존률을 보였다. 이에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 9에 나타나 있다. 여기서 빔 손실이 일어나는 부분은 크게 두 부분으로 에너지 감속장치를 통과한 빔은, 또 다시 collimator 를 통과하면서 1 % 정도 살아남고, 90도 횡용 전자석에 의해 운동량 퍼짐만큼 빔이 퍼져 수 0.01 % 미만의 빔이 집속 전자석에 충돌하지 않고 살아남았다.

Collimator 에 의해 감소된 빔의 양을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과는 그림 10과 같으며, 이와 같은 방법으로 계산한 결과, 10,000개의 빔 중 8개의 빔이 노즐에서 살아남았으며, 생존률은 0.08% 를 보였다. 이는 collimator 를 사용하지 않더라도 에너지 감속장치에 의한 운동량 퍼짐에 의해 상당량의 빔이 손실되는 것을 의미한다.

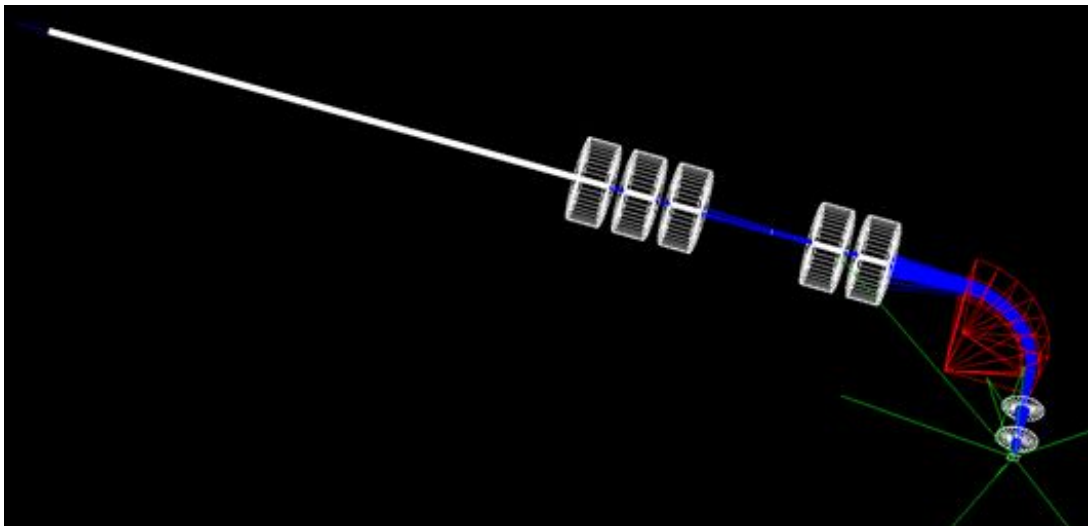


그림 9. 에너지 감속장치와 2개의 collimator 를 순서대로 설치한 경우 빔 전송 시뮬레이션 결과

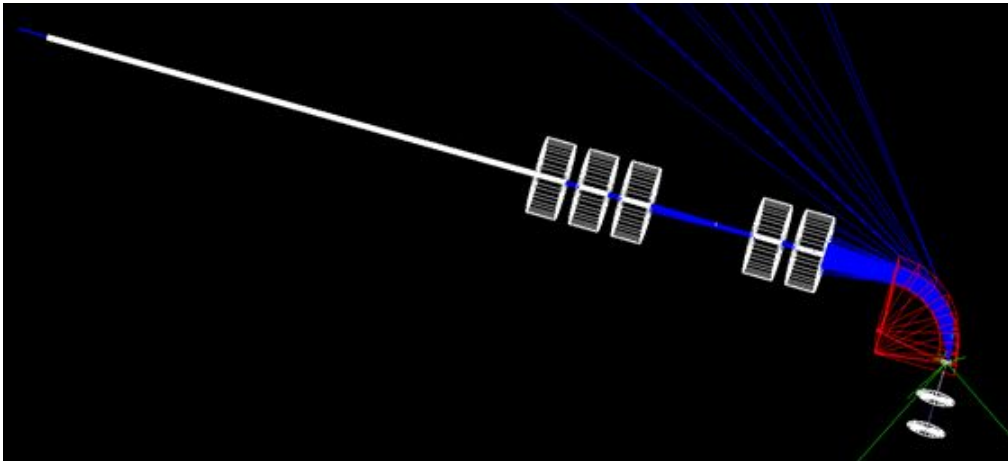


그림 10. 에너지 가속장치를 90도 횡용 전자석 입구에 설치한 경우 빔 전송 시뮬레이션 결과

앞서 계산된 결과의 비교를 위해 에너지 가속장치를 제거하여, 운동량 퍼짐이 없는 빔에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과, 10,000개의 빔 모두 노즐까지 전송되는 것을 통해 에너지 가속장치에 의한 운동량 퍼짐이 빔 손실의 주요 원인임을 확인하였다. 이 결과는 그림 11에 나타나 있다.

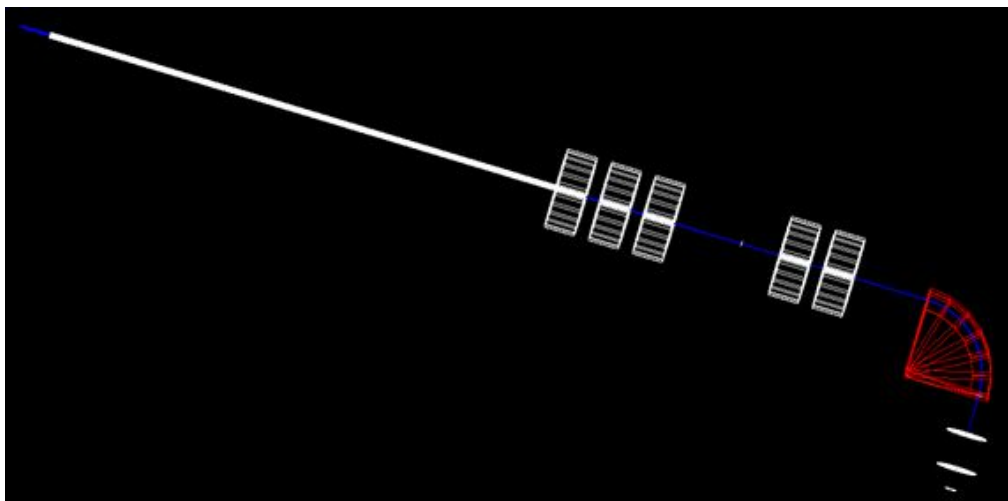


그림 11. 에너지 가속장치와 Collimator를 제거한 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과, PIXE-PIGE 분석용 3 MeV 대역의 양성자 빔을 인출하기 위하여 사용된 에너지 가속장치 및 빔 정의 collimator 를 통과한 빔의 크기 변화를 평가한 결과는 그림 12에 제시하였다. 그림에서 각각의 운동량에 대한 빔의 크기는 청: $\Delta p/p < 4\%$, 적: $\Delta p/p < 2\%$, 녹: $\Delta p/p < 1\%$, 보라: $\Delta p/p < 0.5\%$ 로 각각 나타났으며, 0.5% 이상의 운동량을 지닌 빔은 빔 라인의 수평 구경에 의해 손실됨을 보여주며, 운동량 퍼짐이 4.5% 정도임을 고려하면 빔 정의 collimator를 통과한 빔이 노즐까지 도달할 생존률은 약 0.01% 수준임을 확인하였다.

결과적으로 빔 정의 collimator의 구경을 최대한 늘려도 빔 전송 비율은 0.06% 수준이고, 심지어 collimator를 사용하지 않아도 전송 효율은 0.08% 수준이므로 이는 에너지 가속장치를 통과한 빔의 운동량 퍼짐이 4.5% 수준으로 매우 크기 때문에, 대부분 90도 휨용 전자석에서의 빔 퍼짐에 의한 것임을 확인할 수 있었다.

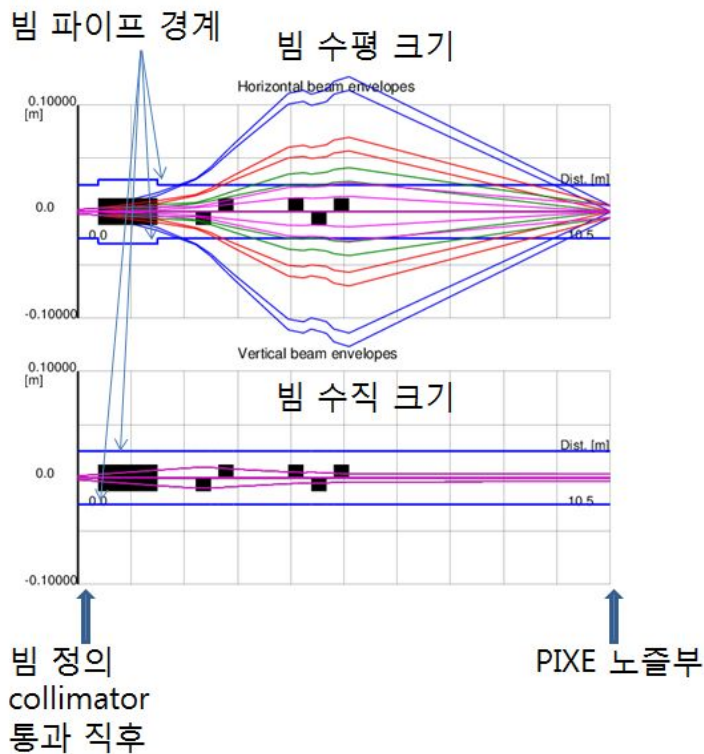


그림 12. 운동량 퍼짐에 따른 빔 크기 변화분석결과

따라서 사이클로트론에서 인출한 1 uA 의 빔을 수송하는 경우 0.1 nA 의 빔이 PIXE-PIGE 챔버의 노즐까지 전송될 것이며, 이렇게 전송된 빔을 분석시료에 조사하기 위해 설치된 PIXE-PIGE 챔버의 노즐 collimator(구경 5 mm)를 통과시킬 경우 빔 전송 비율이 최종적으로 0.001 ~ 0.002% 수준으로 약 10 ~ 20 pA의 전류량이 인출되는 것으로 계산되었다.

3. 빔 라인 전자석 설계

빔 라인에서 전자석은 사이클로트론에서 생성된 이온입자를 사용하기 위해 특수 장소로의 이동을 목적으로 하고, 이온빔을 사용자의 요구조건에 최적화시키기 위해 빔 수송단에 설치되는 장치이다.

PIXE-PIGE 분석 시스템에 사용된 전자석의 구성은 그림 13에서 보이는 바와 같이 90도 휨용 전자석, 4극 전자석, 조절용 전자석으로 구성되었다.

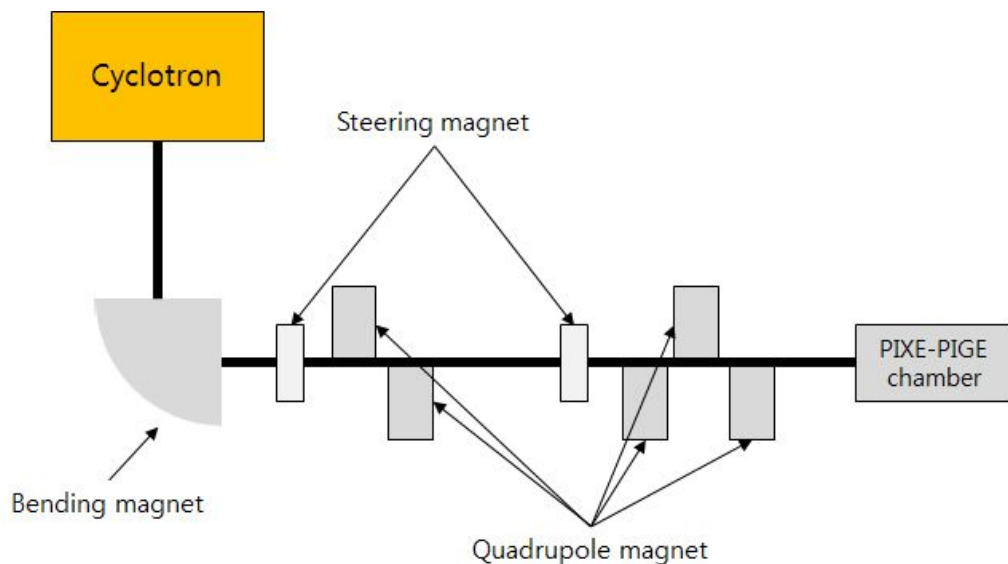


그림 13. 빔 수송단 전자석 구성

90도 횡용 전자석은 빔 수송단의 방향을 변경할 경우 빔의 방향을 결정하는데 사용된다. 또한 90도 횡용 전자석은 빔의 에너지를 결정하는데 사용된다. 빔 라인에서의 90도 횡용 전자석인 2극 전자석은 사이클로트론과 동일한 높이로 설치되어있는 빔 수송단에서 이온빔의 방향을 선택하므로 x 축 방향으로만 이온빔의 입사 방향이 변경되도록 설계되어 있다.

4극 전자석은 빔의 집속을 위해 존재하며, 2중 또는 3중으로 구성되어 있다. 조절용 전자석은 빔 라인상의 빔의 수직, 수평상의 위치 조정을 담당하며, 90도 횡용 전자석은 빔의 에너지 및 방향 선택에 사용된다.

가. 90도 횡용 전자석

사이클로트론에서 인출되는 양성자 빔의 에너지는 13 MeV 로 고정되어 있으나 에너지 감속장치를 통과한 후 양성자의 에너지가 달라지기 때문에 13 MeV 사이클로트론의 수송 방향에 대한 굽힘 각도와 필요한 자기장의 세기도 빔의 에너지에 따라 달라진다.

90도 횡용 전자석 설계에서는 차폐문과의 거리를 충분하게 확보하기 위해 빔의 회전 각도를 90° 로 하고 최종 단에서 사이클로트론의 최대 에너지인 13 MeV 양성자를 인출할 수 있도록 자기장 세기를 높게 설계하였다.

90도 횡용 전자석의 크기를 고려하여 자기장 세기를 0.7 Tesla 까지 낮출 수 있을 경우, 회전 반경이 750 mm 로 결정되어지며 총 회전 길이는 1.2 m 인 것으로 계산 되었다. 따라서 본 90도 횡용 전자석은 회전 반경 750 mm, 자기장 세기 최소 0.7 Tesla 를 기본으로 빔을 제어하도록 설계를 하였다. 실제 제작은 여유도를 포함하여야 하므로 이를 고려하여 제작 하도록 한다. 이와 같은 계산결과를 이용하여 설계한 90도 횡용 전자석의 설계 사양은 표 5와 같다.

표 5. 90도 횡용 전자석의 설계사양 도출결과

에너지 (MeV)	방향	굽힘 각도 (°)	필요한 자기장 (T)	회전 반경 (mm)
13	LEFT	90	+1.0164	500
13	LEFT	90	+0.7	750

빔 옵틱스 계산을 통해 90도 휨용 전자석의 설계 사양은 도출되었으며, 이 사양을 이용하여 13 MeV 양성자 빔에 대한 회전반경 시뮬레이션을 수행하였다.

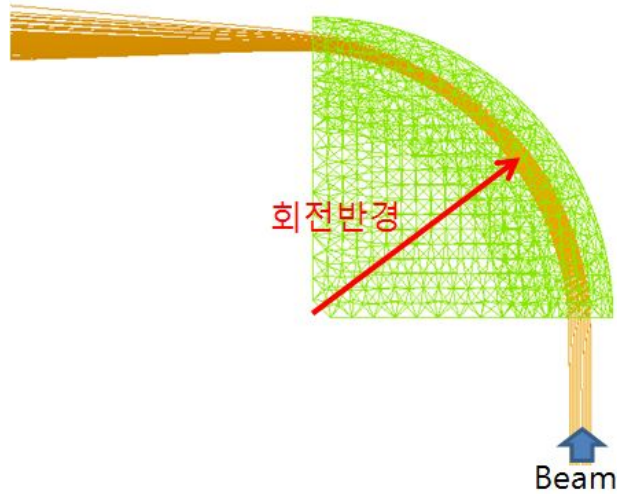


그림 14. 13 MeV 빔의 회전반경 시뮬레이션 결과

그림 14는 90도 휨용 전자석의 크기 및 요구되는 자장의 세기를 결정하기 위한 시뮬레이션 결과이며, 빔을 90° 회전시키기 위한 회전 반경을 계산하는 모델로 사용하였다. 인출할 수 있는 빔의 최대에너지를 13 MeV로 설정하고 최적의 빔 궤적에 맞게 90°의 각도로 빔을 회전시키기 위한 전자석의 강성률은 아래의 식과 같이 0.522 Tm로 계산되었다.

$$\begin{aligned}
 13 \text{ MeV 양성자 빔의 자기장 강성률} &= \text{운동량} / \text{전하수} / \text{빛의 속도} \\
 &= 0.522 \text{ Tm}
 \end{aligned}$$

이와 같이 계산된 90도 휨용 전자석의 강성률에 대하여 90도 휨용 전자석의 빔 회전 반경이 500 mm 일 때 1 T, 750 mm 일 때 0.7 T의 자기장이 필요한 것으로 각각 계산됨을 그림 15를 통해 확인할 수 있었다.

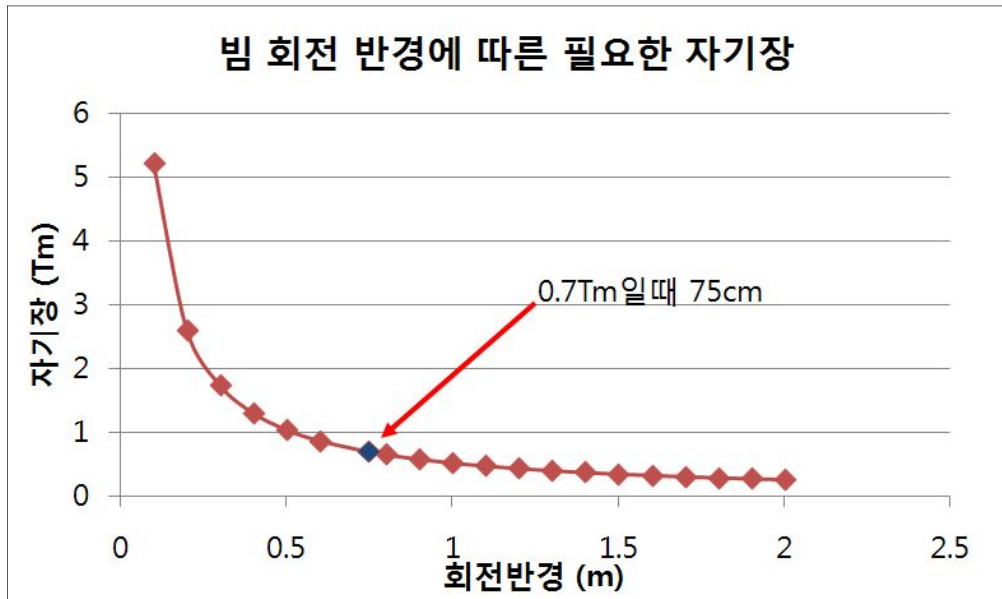


그림 15. 90도 횡용 전자석 회전반경 계산결과

90도 횡용 전자석 회전반경 계산결과를 이용하여 13 MeV의 빔을 90°로 꺾을 경우 90도 횡용 전자석의 빔 경로 길이는 1,200 mm로 계산되었다. 최종적으로 사이클로트론 Vault의 공간배치를 고려하여 빔 라인에 사용될 분석용 전자석의 회전반경을 750 mm로 결정하고 이에 대하여 전자석 설계를 수행하였다. 그림 16은 이와 같이 계산을 통해 설계된 90도 횡용 전자석의 상세 설계도이다.

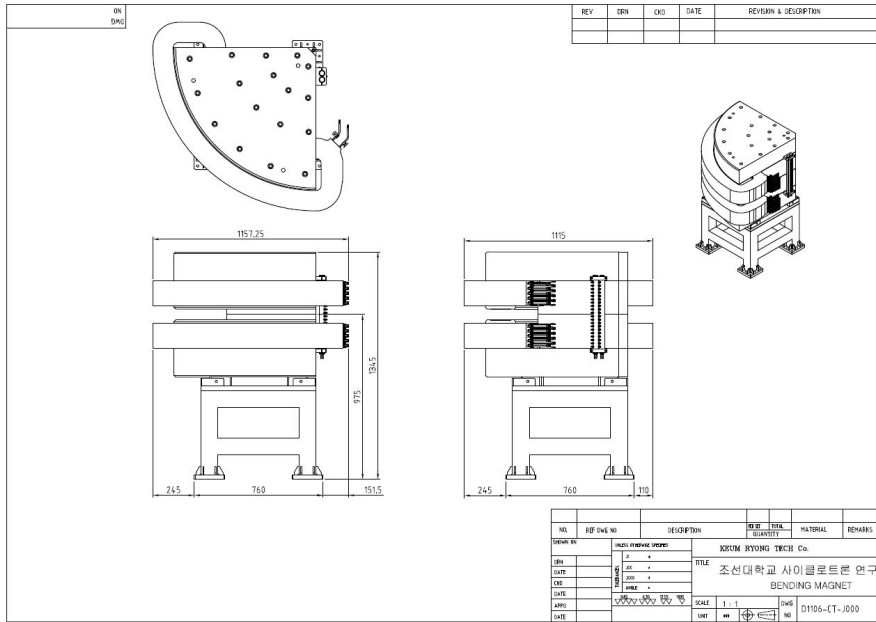


그림 16. 90도 휨용 전자석 상세 설계도

설계된 90도 휨용 전자석의 자기장 해석을 위하여 OPERA-3D 프로그램을 사용하였다. 으며, 상기에서 설계된 설계도면을 그림 17과 같이 3차원 입체영상으로 변형시켜 프로그램에 적용하였다. OPERA-3D 프로그램은 전자기학적 물리 설계를 위한 자동화 프로그램이다. 1984년부터 지속적으로 개발되고 있으며, 전 세계에 걸쳐 산업 및 과학 분야에서 전자기학 분석에 주로 사용되는 프로그램이다.

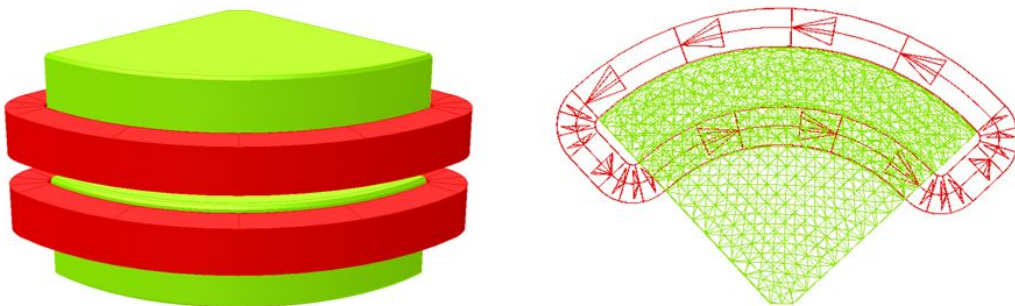


그림 17. OPERA-3D 프로그램을 이용한 90도 휨용 전자석의 3차원 입체영상

본 논문에서는 OPERA 3D 프로그램을 이용하여 3차원 형상을 구현하여 90도 횡용 전자석의 field strength 를 계산하였다. 그림 18은 field strength 계산결과를 보여준다. 좌측 그림에서 화살표 부분은 전자석의 빔 입사/인출 부분의 Shimming 부분에서 field saturation 이 발생하는 것을 보여주는 그림이다.

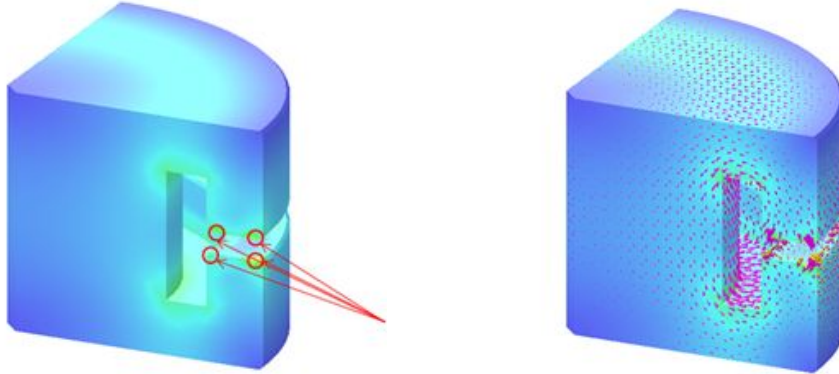


그림 18. 90도 횡용 전자석의 field strength

위와 같이 90도 횡용 전자석에 대한 자기장 해석결과 그림 19와 같이 나타났다. 그림에서 붉은색 원 부분을 살펴보면 자기장 분포의 Tail 구조를 보이며, 전자석의 유효길이는 전자석 구조에 의한 길이인 1,200 mm 보다 길어지는 것을 알 수 있었다.

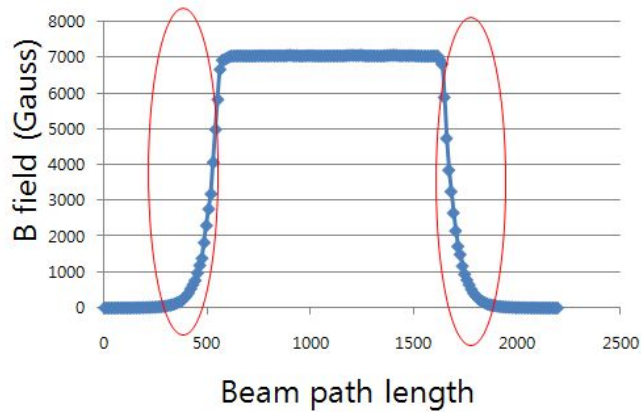


그림 19. 13 MeV 양성자에 대한 90도 횡용 전자석의 자기장 분포

결과적으로 빔이 휘어지는 평면상으로 크기가 클 경우 빔 손실이 커지는 점을 빔 라인 설치 시 고려해야 하며, 전자석의 effective length 가 1,270 mm 로 설계 길이보다 약 70 mm 긴 것을 확인하였으므로, 빔 옵틱스 계산에서 90도 횡용 전자석 길이 보정에 반영하였다.

나. 4극 전자석

4극 전자석의 설계는 앞서 설명한 13 MeV 양성자 빔을 이용한 그림 7의 빔 옵틱스 해석용 전자석 배치에 따라 빔 옵틱스 계산 결과로 자기장 세기가 결정되며, 이에 따라 상세설계가 이루어진다.

빔 옵틱스 해석에서 빔 단면 분포도를 확인하면 빔의 단면적이 최대 10 mm를 넘지 않는 상황으로 빔이 4극 전자석을 통과할 경우 수직 또는 수평 방향으로 집속이 이루어지며, 반대로 수평 또는 수직 방향으로 빔은 퍼지게 된다. 이를 적절히 조절하기 위해 2중 4극 전자석과 3중 4극 전자석이 사용 되었다.

빔 옵틱스 해석 시 4극 전자석에 사용되는 magnet field gradient는 2.61 T/m 으로 계산되어지나 자기장을 여유 있게 조정하기 위해서 3.5 T/m이 되도록 설계 하였다. 이 때 사용되는 자장 전류는 8A, 5V 로 계산되었다.

이와 같은 방식으로 4극 전자석의 설계 사양을 도출하고 상세 설계도를 완성하였다. 그림 20과 그림 21은 4극 전자석의 상세 설계도이다.

13 MeV 양성자를 전송하기 위한 빔 라인의 4극 전자석 자기장 해석을 위하여 90도 횡용 전자석과 동일한 방법으로 수행하였다. 4극 전자석의 상세 설계도면을 이용하여 그림 22와 같이 3차원 입체영상에 대한 field strength를 계산하였다.

90도 횡용 전자석과 동일하게 OPERA-3D 프로그램을 이용하여 빔 라인 구경에 해당하는 60 mm 폭의 빔이 전자석에 입사한 경우에 대해 빔 tracking 계산을 수행하였다. 집속용 전자석에 대한 빔 tracking 계산결과는 그림 23과 같다. Beam tracking 계산결과 y 방향으로 빔을 집속하면서 x 방향으로 빔을 퍼트리는 것으로 계산되었다.

또한 focal length는 전자석 중심 위치 대비 415 mm 이고, focal strength는 1/focal length로 2.41 m⁻¹로 계산되었다. 이 계산 결과는 설계 최대 수치인 4 T/m에 대해 얻어진 값으로 자기장 설정 값에 따라 focal length 및 focal strength는 달라진다.

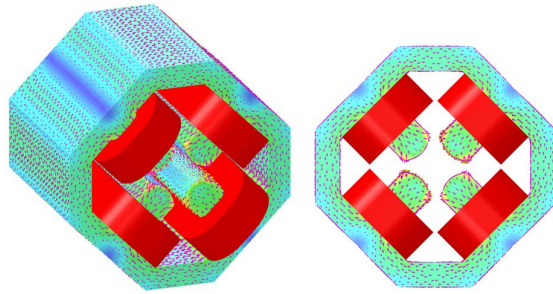


그림 22. 4극 전자석의 field strength

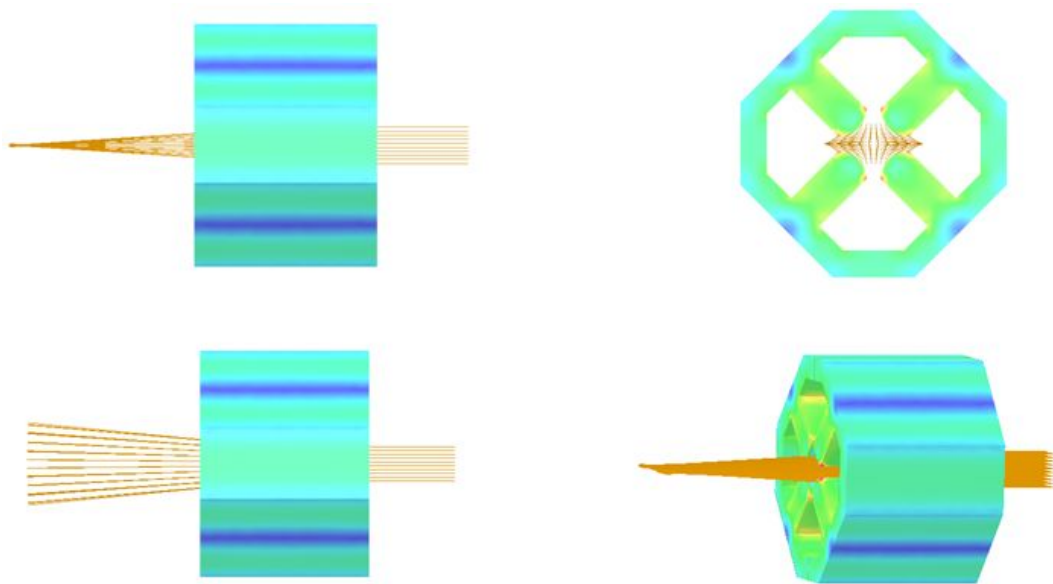


그림 23. 4극 전자석에 대한 빔 tracking 계산 결과

2차원 자기장 분포해석에서는 중심점을 중심으로 동심원 상의 2차원 자기분포가 대칭적으로 형성됨을 확인하였으며, Pole의 edge 부분의 field가 집중되나 field saturation 이 발생하기 이전인 1 Tesla 미만으로 field 분포의 왜곡은 발생하지 않았다. 그림 24는 2차원 자기장 분포해석 결과를 보여준다.

결과적으로 집속용 전자석 자기장 해석 결과, 빔 tracking 계산으로 집속 효과 확인

하였으며, 기존 설계 전류 수치를 2배 증대 시킬 경우 field 분포 역시 2배 가까이 선형적으로 증가함을 확인하였다. 아울러 전자석 구조상 최대 전류수치를 2배로 늘리는 것이 가능하므로, 4극 전자석 코일을 공랭식으로 설계해도 문제가 없는 것으로 분석되었다.

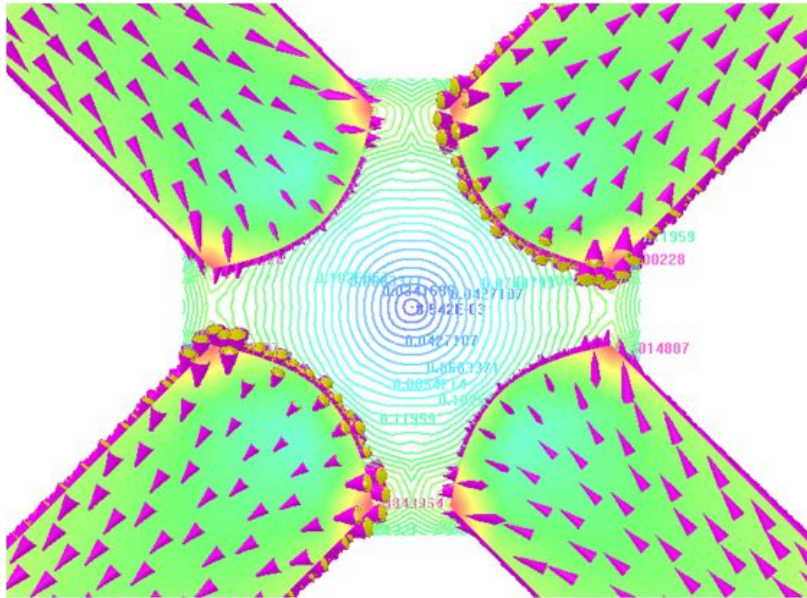


그림 24. 4극 전자석의 2차원 자기장 분포해석 결과

다. 조절용 전자석

빔 라인의 정렬시 시공적인 측면에서 약간의 오차가 필연적으로 발생하게 되는데 이를 보완하기 위해 조절용 전자석을 설계하였다. 일반적으로 조절용 전자석의 설치 장소는 90도 휨용 전자석이나 4극 전자석 입구에 설치되는 것이 일반적이나 공간상의 제약과 함께 90도 휨용 전자석은 y 축의 위치 조절이 어느 정도 가능하므로 90도 휨용 전자석의 전단에는 생략하고 2중 4극 전자석과 3중 4극 전자석 전단에 설치하도록 설계하였다.

또한 조절용 전자석은 13 MeV 양성자 빔의 magnet rigidity가 0.522 T/m 임을 고려할 때 0.1 T에서 회전반경 5,220 mm, 0.2 T에서 2,610 mm 이므로 최대 0.1 T의

field 면 충분한 것으로 분석되었다. 이 부분은 시공 상의 정렬 정도에 따라 값이 변하게 되는데 시공 후의 오차를 예측할 수가 없어 최대값으로 산정을 하였고, 이때 사용되는 전원 공급 장치는 최대 2A, $\pm 5V$ 를 기준으로 설계하였다.

조절용 전자석 은 이온 빔의 x, y 축의 세밀한 위치 조절을 담당하게 되며 중심축에서 틀어진 정도를 보정하여 최종 단에서 이온빔의 위치를 중심으로 맞추는 역할을 한다. 따라서 세밀한 위치 조절은 측정된 이온빔을 기준으로 상하 좌우의 조절이 필요하게 되므로 bipolar 형식의 필드방향 조절이 가능하도록 제작 되며 극성의 전환은 MPS 에서 조절하도록 설계하였다.

라. 빔 라인 전자석 전원공급장치

빔 옵틱스 계산에 사용된 전자석 설계 사양을 바탕으로 각각의 전자석에 대한 MPS를 설계하였다. 표 6은 빔 라인 전자석에 대한 MPS 설계 사양이다. 정격출력은 90도 휨용 전자석 MPS, 4극 전자석 MPS, 그리고 조절용 전자석 MPS 가 각각 1~80V/1~70A, 1~10V/1~40A, $\pm 1\sim 5V/\pm 1\sim 20A$ 로 설계되었다. 제어의 안정성 측면에서 안정도는 모두 ± 100 ppm 을 유지하도록 설계되어 있어 비교적 정밀한 제어가 이루어지도록 설계하였다. 냉각방식은 모두 공랭식으로 설계하였다.

표 6. 빔 라인 전자석 MPS 최종 설계사양

사 양	2극 MPS	4극 MPS	Steering MPS
Input	3상 380VAC	3상 380VAC	3상 380VAC
정격출력	1~80V/1~70A	1~10V/1~40A	$\pm 1\sim 5V/\pm 1\sim 20A$
3상 60Hz트랜스	1차:380VAC, 2차:82VAC, 12kVA, 1차:380VAC, 2차:9VAC, 3.2kVA (공동사용)		
극성	Unipolar	Unipolar	Bipolar
Warm up time(cold start)	80 min	80 min	80 min
Warm up time(from stby)	20 min	20 min	20 min

표 6. 빔 라인 전자석 MPS 최종 설계사양 (계속)

사 양	2극 MPS	4극 MPS	Steering MPS
Stability	± 100ppm	± 100ppm	± 100ppm
DriftLongterm8Hrs(fwhm)	± 100ppm	± 100ppm	± 100ppm
DC output isolation resistance	> 1 Mohm	> 1 Mohm	> 1 Mohm
냉각 출력제어범위	공랭식 1A~70A	공랭식 0.4A~40A	공랭식 -20A ~+20A
OverCurrent Protection	Typical 110% 사용자 변경가능	사 Typical 110% 사용자 변경가능	Typical 110% 사용자 변경가능
OverVoltage Protection	Typical 110% 사용자 변경가능	사 Typical 110% 사용자 변경가능	Typical 110% 사용자 변경가능
OverTemperature Protection	65℃	65℃	65℃
Switches	IGBT	IGBT	IGBT
Switching Freq.	20kHz	25kHz	25kHz

제 2 절 이온빔 분석 시스템 제작 및 설치

1. 빔 라인 진공 시스템

가속기로부터 PIXE-PIGE 챔버 까지 연결된 빔 라인의 총 길이는 9 m 에 이른다. 빔 라인을 구성하는 빔 튜브의 직경은 60 mm 이며, 이러한 빔 튜브는 1개의 90도 휨용 전자석 챔버, 빔 프로파일 챔버, 그리고 PIXE-PIGE 챔버 사이를 연결하는데 사용된다. PIXE-PIGE 분석용 빔 라인의 진공도는 빔 조사 시 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ mbar 수준을 유지할 수 있도록 설계하였으며, 이 진공 시스템에는 빔 조사 중 가속기가 갑자기 정지하는 비상사태 발생 시 진공펌프를 보호하기 위하여 사이클로트론과 90도 휨용 전자석 사이, 그리고 90도 휨용 전자석과 빔 프로파일 챔버 사이에 gate valve 를 설치하도록 설계하였다.

빔 라인의 진공도를 유지하기 위하여 2 가지의 진공펌프를 사용하여 진공 시스템을

설계하였다. 가속기에는 오일 확산 펌프가 고진공을 유지하고, 빔 라인의 빔 프로파일 챔버 와 PIXE-PIGE 챔버 에는 터보 펌프를 하는 것으로 설계하였다. 그림 25는 가속기 및 PIXE-PIGE 분석용 빔 라인의 진공 시스템 설계도이다.

PIXE-PIGE 분석 챔버 등에 터보 펌프를 설치하는 이유로는 PIXE 또는 PIGE 분석 시 가속기의 오일 확산 펌프에서 발생된 미세한 오일 입자가 진공 중에 확산되어 양성자 빔과 반응하여 PIXE 또는 PIGE 분석에 오차를 발생시킬 우려가 있으므로 이러한 오차를 최소화하기 위함이다. 2개의 터보 펌프가 장착되는 빔 프로파일 챔버 와 PIXE-PIGE 챔버 에는 1개의 고진공 센서와 3개의 저진공 센서를 장착하여 빔 라인의 진공도를 대기압부터 1×10^{-9} mbar 범위까지 모니터링 할 수 있도록 설계하였다.

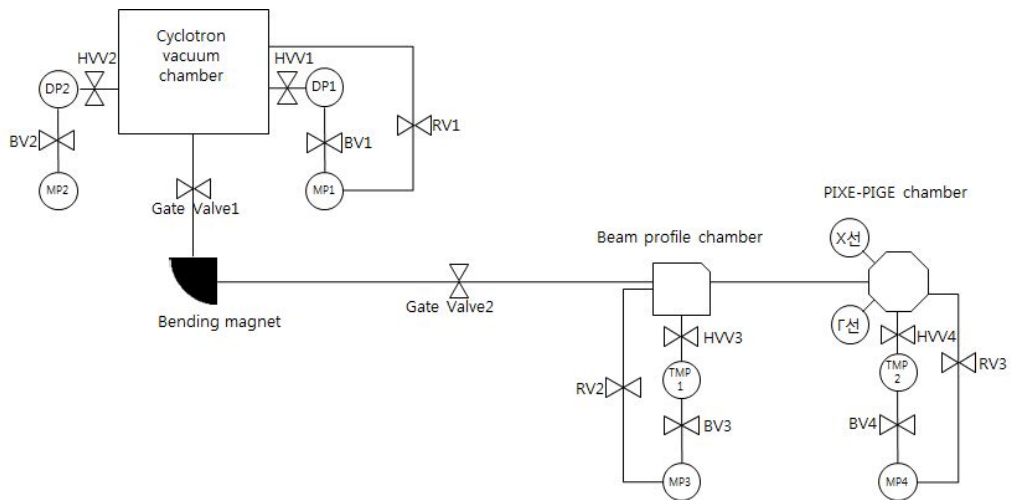


그림 25. PIXE-PIGE 분석용 빔 라인의 진공 시스템

2. 가속기 및 빔 라인 냉각 시스템

기존에 설치되어 있는 사이클로트론용 냉각장치는 동위원소 생산 목적으로 사이클로트론 운영에만 사용되므로 빔 라인 증설에 따른 냉각장치 설비 보완 및 성능개선이 필요하다. 그림 26은 기존의 사이클로트론 냉각장치의 구성 및 역할을 나타낸 그림이다.

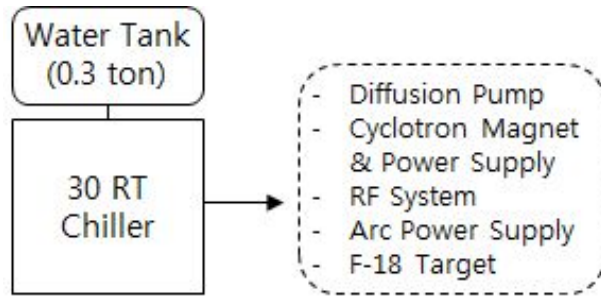


그림 26. 기존의 사이클로트론 냉각장치의 구성 및 역할

기존 냉각장치의 냉각수 저장탱크는 저장용량이 0.3 ton 으로 냉각수 온도변화에 대한 완충효과가 거의 나타나지 않았다. 또한 냉각수를 공급하는 급수펌프가 단일화 되어있어, 각 계통마다 냉각수 공급부하가 다르므로 냉각수 유량이 일정하게 유지되지 못하였다. 이러한 결과는 빔 인출 시 RF 시스템 냉각에 영향을 미쳐 양성자 빔이 일정하게 인출되지 못하는 결과로 나타났다. 그림 27은 냉각수의 온도변화에 따라 인출되는 빔 전류가 연동되는 그림이다.

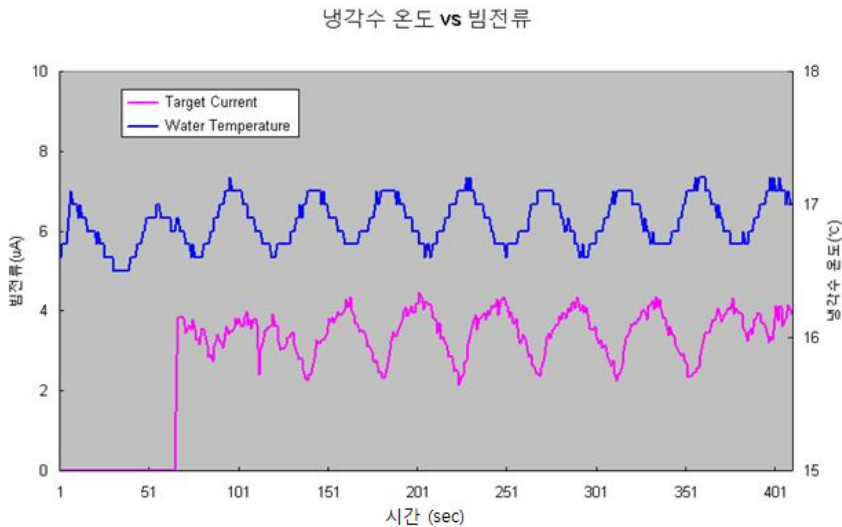


그림 27. 냉각수 온도변화에 따른 빔 전류 변화

따라서 기존 사이클로트론 냉각 시스템을 그대로 사용하는 경우 빔 전류의 안정적인

유지가 어렵고, 더욱이 빔 라인 증설 시에는 그 영향이 더욱 심화될 것이므로 냉각장치의 성능개선이 반드시 필요하다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 냉각장치의 성능개선을 그림 28과 같이 수행하였다. 냉각수 저장탱크의 용량을 1.2 ton 으로 대폭 증가시켜 냉각장치 가동에 따른 냉각수의 온도변화를 최소화 시켰으며, 소형 5 RT 냉각장치를 추가하여 상시 가동되어야 하는 Diffusion Pump 와 빔 라인의 Turbo Molecular Pump 전용으로 가동시키고, 30 RT 대형 냉각장치는 사이클로트론 가동 시에만 사용되게 하였다. 또한 각각의 가속기 계통과 빔 라인 계통의 효율적인 냉각을 위해 각 계통별 독립적인 냉각수 공급 장치를 두어 안정적인 냉각수 공급이 이루어지도록 설계하였다. 각 계통별 급수펌프와 냉각수 공급 장치는 독립적으로 동작하며, 모든 냉각수 공급 라인에 유량이 일정하게 유지될 수 있도록 냉각수 공급 장치의 크기를 충분히 크게 설계하였다.

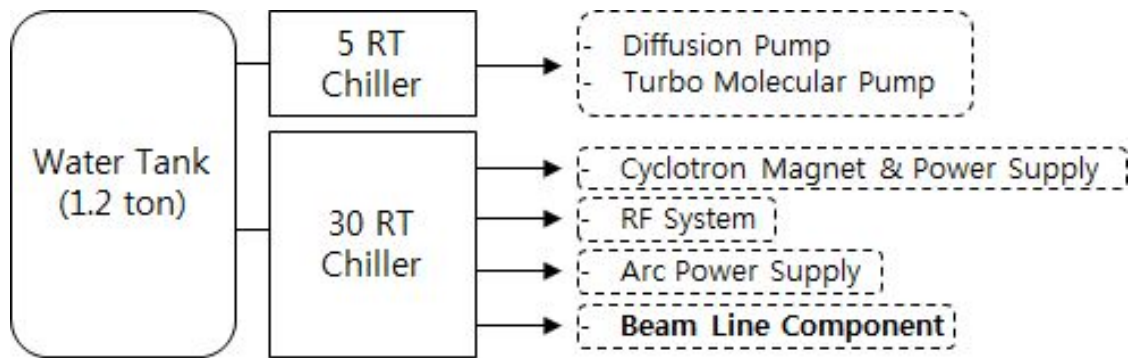


그림 28. 성능개선 후 냉각장치

이와 같이 냉각장치 성능개선을 통해 빔 조사 시 냉각수 온도변화는 그림 29와 같이 안정될 수 있었으며, 빔 라인 증설에 따른 냉각장치의 냉각용량도 충분하게 확보할 수 있었다. 아울러 냉각수 저장탱크의 용량 증가로 인해 냉각수의 온도변화 주기가 1 시간 정도로 길어지면서 인출되는 빔 전류도 안정되었다.

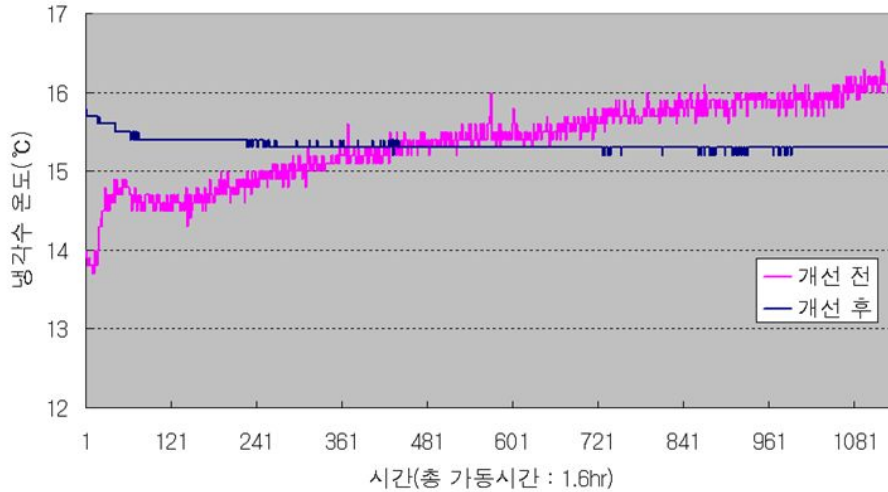


그림 29. 냉각장치의 냉각성능 비교

3. 이온빔 수송계통 구성품

가. 전자석 및 전원공급장치

90도 횡용 전자석과 4극 전자석에 대한 자기장 해석을 통해 전자석 운전 여유도를 확인하고, 최종적인 전자석 제작을 수행하였다. 90도 횡용 전자석용 진공 챔버 내부에는 빔이 휘는 방향에 대해 양성자에 의한 방사화를 방지하기 위한 흑연 블록이 설치되어 있으며, 흑연 블록에 대해 각각 빔 전류를 측정할 수 있도록 설계하여 빔의 휨 정도를 확인할 수 있게 하였다. 4극 전자석은 총 5개를 제작하여 2중 집속과 3중 집속용으로 제작하였다. 4극 전자석 진공 챔버는 빔 라인 사이에 설치되므로 전자석 사이에 삽입이 용이하고, 연결부위의 진공유지가 중요하다. 4극 전자석 진공 챔버의 양단에는 빔 라인 구성품인 Faraday Cup 또는 빔 모니터, 빔 평활화 장치 등이 자유롭게 장착될 수 있도록 설계하는 것이 중요하다.

조절용 전자석의 위치는 집속용 2중 4극 전자석과 3중 4극 전자석 전단에 설치하여 빔의 방향을 조절하는데 사용된다. 조절용 전자석을 4극 전자석 진공 챔버에 장착하기 위해 별도의 절연된 어댑터를 설계하여 설치가 용이하게 하였다.

90도 횡용 전자석 및 4극 전자석, 그리고 조절용 전자석에 대한 전원공급장치는 앞에서 설계한 설계사양에 맞춰 제작되었다. 90도 횡용 전자석을 제어하기 위한 전원공급장치는 최대 70A 까지 출력할 수 있으며, 13 MeV 양성자 빔을 조절하기 위해서는 58A 정도가 입력된다. 안정된 운전을 위하여 17%의 충분한 여유도를 확보하여 제작하였다.

4극 전자석 전원공급장치는 4극 전자석이 빔 라인에 총 5개가 설치되므로 이들 각각을 제어할 수 있도록 5개가 제작되었다. 이들의 사양은 40A 까지 전류를 출력할 수 있으며, 13 MeV 양성자를 제어하기에는 30 A 정도가 소요된다. 이들 4극 전자석 전원공급장치의 운전 여유도는 약 25%로 제작되었다.

조절용 전자석 전원공급장치는 조절용 전자석 1쌍이 각각 x축과 y축 제어에 소요되므로 총 4대의 전원공급장치로 이루어져있다. 이들의 설계용량은 20A 로 13 MeV 양성자를 제어할 수 있는 범위는 15A 수준이다. 따라서 이들의 운전 여유도는 25%이다.

이와 같이 총 10개의 전원공급장치를 두 개의 부분으로 나누어 배치하였다. 4극 전자석 전원공급장치 5기를 하나의 랙마운트에 연결하였으며, 90도 횡용 전자석 전원공급장치와 조절용 전자석 전원공급장치를 다른 하나의 랙마운트에 연결하였다.

나. 이온빔 에너지 감속장치

PIXE-PIGE 분석에는 3 ~ 5 MeV의 에너지를 갖는 양성자 빔이 일반적으로 사용된다. 조선대학교에 설치되어 있는 KIRAMS-13 사이클로트론에서 인출되는 에너지는 최대 13 MeV로 PIXE-PIGE 분석에 사용하기에는 다소 높은 에너지를 가지고 있다. 따라서 빔 에너지 감속장치(이하, 에너지 감속장치)를 이용하여 13 MeV 에너지를 3 ~ 5 MeV로 감속시킬 필요가 있으며, 이에 따라 본 단원에서는 에너지 감속장치를 설계하고 이온빔 반응 시뮬레이션을 수행하였다. Degradar 설계를 위한 Beam의 반응도 계산은 GEANT-4 코드를 이용하였다.

(1) 기체형 에너지 감속장치 (기체형 에너지 감속장치)

가속된 입자의 에너지 감속 방법은 가속입자와 감속재와의 충돌 및 산란에 의한 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 에너지 감속은 감속재로 사용되는 재료의 핵자 밀도에

의존한다.

가속기 분야에서 사용되는 에너지 감속재의 종류로는 주로 Aluminum, Carbon, Beryllium 등이 사용된다. 이러한 에너지 감속재는 대부분 고체의 형태로 이루어져 있으며, 미세 감속을 위해 얇은 두께의 형태를 제작하는 데에는 고 비용이 소요되며, 기계적 강도가 취약하여 취급하는데 어려움이 따른다. 본 연구에서는 에너지 감쇄 방법에 대하여 기존의 방법에 대해 새로운 접근방식을 채택하였다. 현재 사용되고 있는 고체 형태의 감속재가 아닌 기체 형태의 감속 방식을 고안하였다. 감속재를 고체가 아닌 기체로 사용하는 경우, 핵자 밀도를 자유롭게 조절할 수 있으므로 에너지 감쇄를 미세하게 조절할 수 있는 것이 가장 큰 장점이 있다.

기체를 이용한 에너지 감쇄 정도를 관찰하기 위하여 GEANT4 시뮬레이션 코드를 이용하여 결과를 도출하였으며, 기체의 종류로는 He, Ne, Ar 등의 불활성 기체와 CO₂ 혼합 기체를 이용하였다. 기체의 압력을 조절하여 양성자 입자를 입사시킨 시뮬레이션 수행 결과, 기체 밀도가 상대적으로 낮은 He 기체가 빔의 에너지를 미세하게 조절할 수 있는 기체로 나타났으며, 시뮬레이션 결과를 이용하여 실제 기체 감속재에 대한 상세 설계를 수행하였다.

본 연구에서 설계한 기체형 에너지 감속장치는 에너지 감속용 기체를 가둘 수 있는 챔버와 챔버 양 끝단에 0.05 mm 두께의 Ti 박막을 이용하여 기체를 가두고 있다. 기체 챔버의 전/후단에 4극 collimator 를 설치하여 기체 챔버에 입사시키는 빔의 크기를 결정하고, 빔의 퍼짐을 측정할 수 있도록 설계하였다. 그림 30은 GEANT4 코드에 사용된 기체형 에너지 감속장치의 구조도이다.

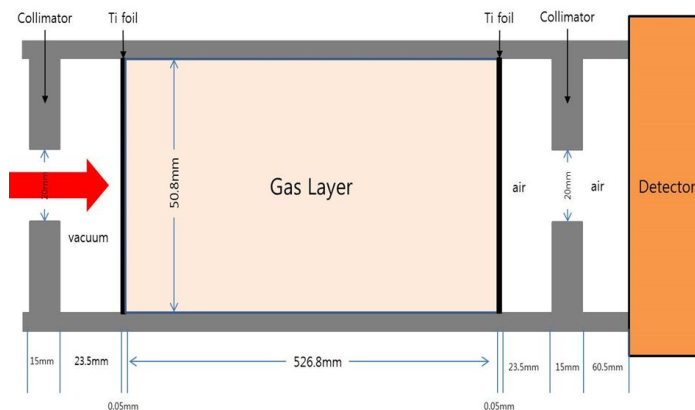


그림 30. GEANT-4 코드에 입력될 기체형 에너지 가변장치 구조도

사이클로트론에서 인출된 13 MeV 양성자 빔은 그림 30의 기체형 에너지 감속장치에서
 충전 되어있는 기체와 충돌 및 산란에 의해 에너지를 잃게 된다. Degradar 재료로 사
 용되는 기체는 양성자 빔의 에너지를 미세하게 조정할 수 있어야 하며, 충돌 및 산란
 후 빔의 퍼짐 정도가 낮아야 할 것이다. 따라서 본 설계에서는 상용화된 불활성 기체
 로 He, Ne, Ar을 사용하였으며, 추가적으로 물질의 밀도에 따른 효과를 비교하기 위하
 여 혼합기체인 CO₂ 기체를 사용하였다. 표 7은 기체형 에너지 감속장치 설계에 사용된
 재료이다.

표 7. 기체형 에너지 감속장치 설계에 사용된 기체의 밀도

Elements	Density (g/cm ³)
Helium	0.000166322
Neon	0.000838505
Argon	0.00166201
CO ₂ gas	0.00184212

기체형 에너지 감속장치를 설계하여 GEANT-4 코드로 시뮬레이션을 수행한 결과 실험
 에 사용된 기체 종류에 따른 에너지 감쇄효과는 그림 31과 같이 나타났다.

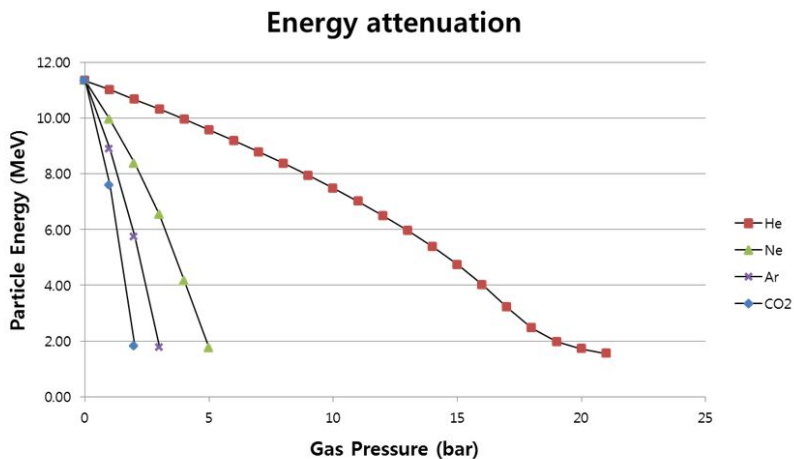


그림 31. GEANT-4 코드를 이용한 시뮬레이션 결과

그림 31은 기체형 에너지 감속장치 에 충전된 기체의 압력변화에 따라 degrader 통과 후 빔의 에너지를 시뮬레이션 실험결과이다. 실험결과 4 가지 기체 중 밀도가 가장 낮은 He은 인가 압력에 따른 에너지 감쇄 기울기가 다른 기체에 비해 매우 낮게 나타났다. 그림 32에는 GEANT-4 시뮬레이션 결과 기체형 에너지 감속장치 에서 입사입자의 산란 및 에너지 감쇄현상을 입체 영상으로 나타낸 그림이다. 상기의 실험을 통해 He 기체는 기울기가 완만하여 미세한 에너지 조절이 가능한 것으로 분석되었다.

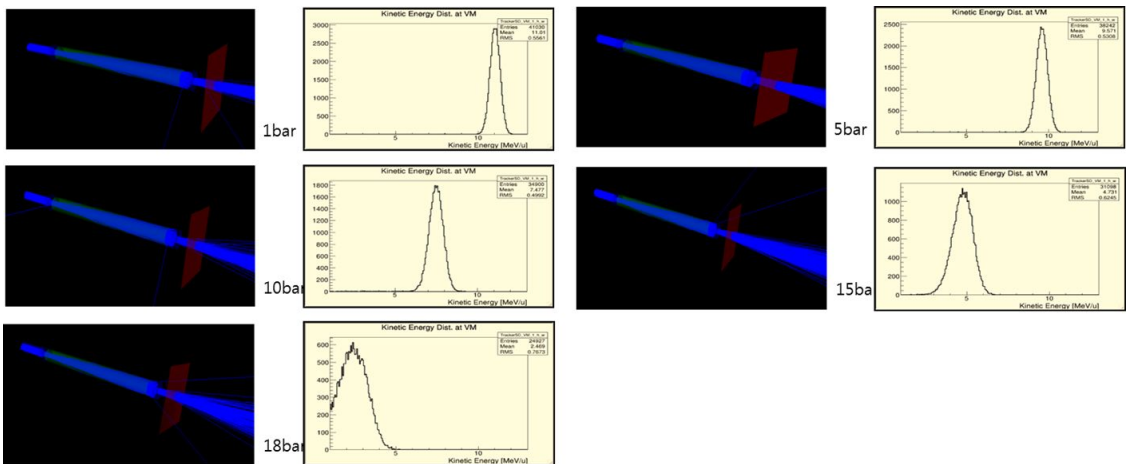


그림 32. 헬륨을 이용한 에너지 감쇄 결과

헬륨 압력에 따른 에너지 감쇄 시뮬레이션 결과를 이용하여 기체형 에너지 감속장치를 설계, 제작하였다. 기체형 에너지 감속장치 설계 시 기체압력 신호수집 및 밸브조절을 위한 장치 및 프로그램의 개발이 동시에 이루어져야 하지만 본 연구에서는 수동으로 조작하는 타입으로 개발하였다.

(2) 고체형 에너지 감속장치

고체형 에너지 감속장치 재질로는 빔 질의 저하가 낮고, 에너지 퍼짐 현상이 적으며, 기계적 강도가 우수하고, 양성자에 의한 방사화를 최소화하기 위하여 흑연을 사용하였다. 고체형 에너지 감속장치는 기체형 에너지 감속장치와는 달리 기체 압력조절 장치

가 필요 없으므로 기체에 비해 상대적으로 사용이 간편하고, 비교적 쉽게 제작할 수 있으므로 실제 실험실에서 주로 사용된다. 그러나 기체형 에너지 감속장치에 비해 미세한 에너지 조절이 불가능한 단점도 가지고 있다. 고체 에너지 감속장치 설계를 위하여 GEANT-4 코드 계산을 위한 시뮬레이션 구조는 그림 33과 같이 배치하였다.

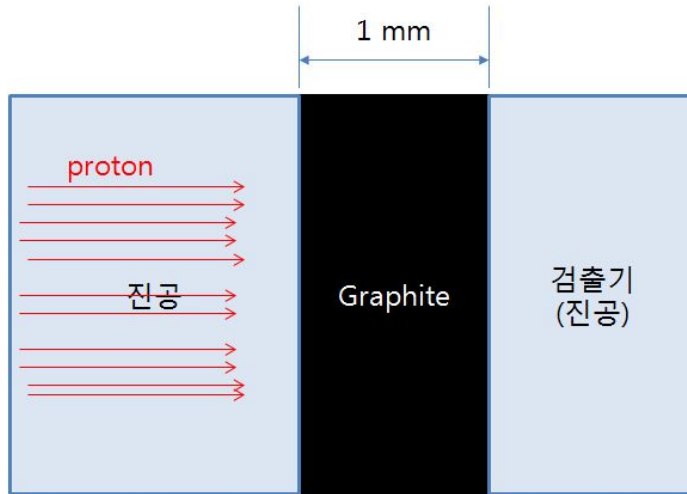


그림 33. GEANT-4 전산모사를 위한 기하학적 배치

GEANT-4 코드를 이용하여 흑연에 대한 양성자의 침투두께 계산결과, KIRAMS-13 사이클로트론에서 인출된 13 MeV 양성자는 흑연의 두께 1 mm 투과하지 못하며, 3 ~ 5 MeV 에너지의 양성자 빔을 인출하는 데는 0.8 mm ~ 0.9 mm의 두께가 필요한 것으로 계산되었다. 이에 따라 다소 번거롭지만 흑연 두께를 종류별로 제작하여 원하는 에너지에 따라 교체하면서 사용하면 에너지 가변도 가능하다. 그림 34는 13 MeV 양성자를 흑연에 입사시켰을 경우 두께에 따른 입자의 투과율을 계산한 결과이며, 그림 35는 PIXE-PIGE에 사용할 에너지인 3 ~ 5 MeV 양성자 에너지 인출에 필요한 흑연 두께별 시뮬레이션 결과이다.

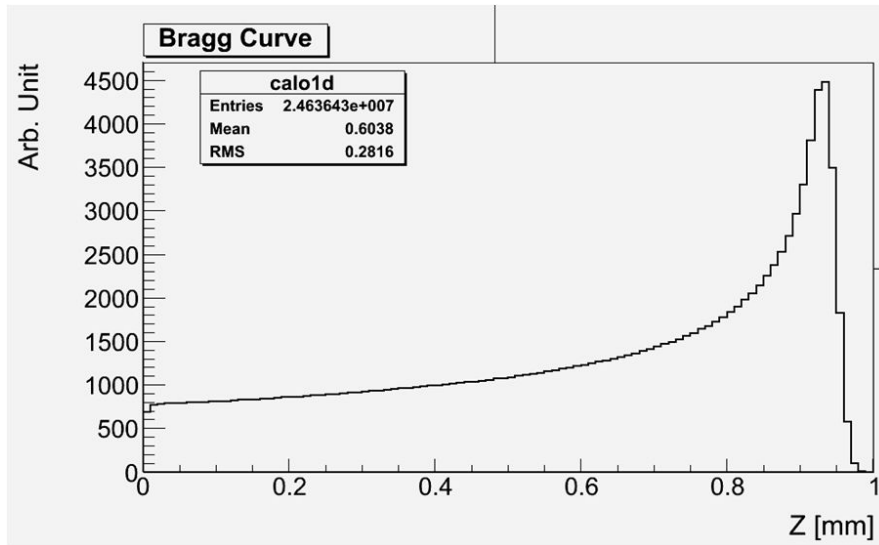


그림 34. 흑연의 13 MeV 양성자 침투 깊이(GEANT-4)

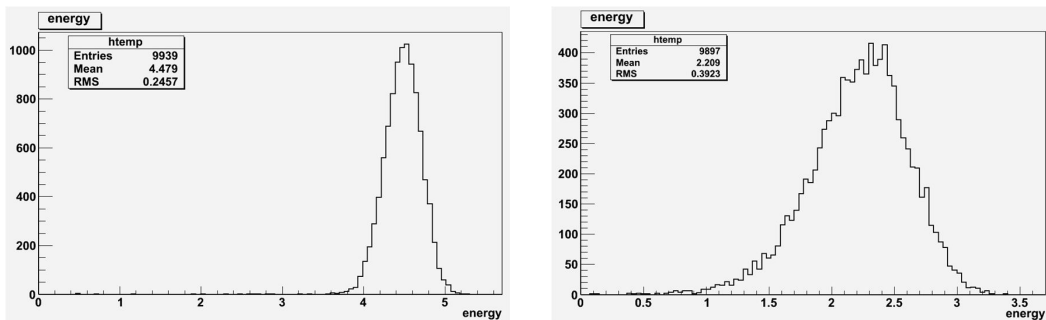


그림 35. 흑연 두께에 따른 인출 에너지 [0.8mm(좌) / 0.9mm(우)]

에너지 가속장치 제작에 사용한 가속재는 흑연으로, 흑연과 양성자 빔의 반응에 의해 발생하는 열은 장치에 냉각수를 주입하여 간접 냉각 방식을 사용하였다. 흑연 박막의 지지는 흑연 블록을 원통형으로 가공하여 양쪽에서 서로 지지할 수 있도록 설계하였으며, 이 원통형 흑연 블록은 가속재인 흑연 박막에 의해 에너지가 가속되고 분산되는 양성자는 제거하고 직선 방향의 양성자만 인출할 수 있도록 collimator 역할을 수행한다. 그림 36은 가속기에서 인출된 양성자 에너지를 가속시키기 위해 설계한 에너지 가속장치의 입체 설계도면이며, 그림 37은 에너지 가속장치 제작도면이다.

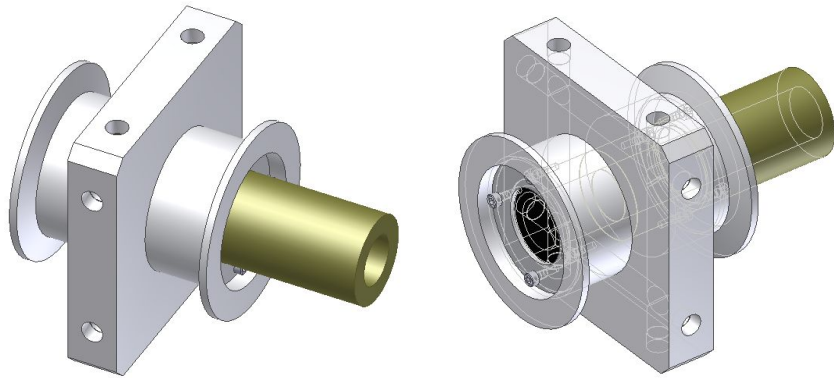


그림 36. 고체형 에너지 감속장치 입체 설계도면

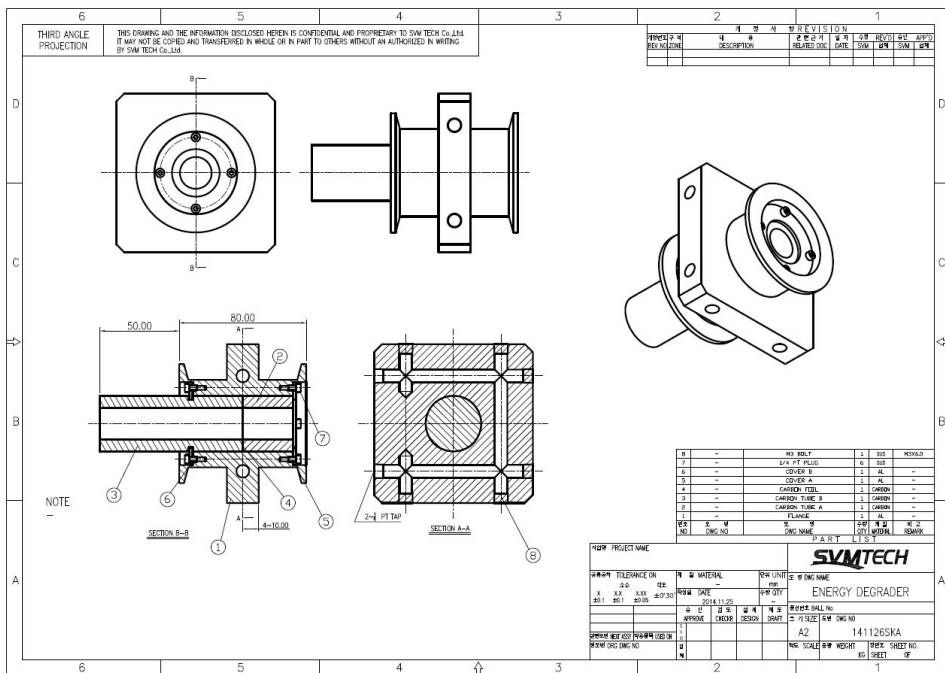


그림 37. 고체형 에너지 감속장치 제작도면

제작된 에너지 감속장치의 원통형 흑연 블록은 외경이 40 mm 이며, 내경은 20 mm 이다. 이 원통형 흑연 블록은 내부에서 2 개로 분리되어 있어서 에너지 감속용 재료를

두께별로 교체할 수 있도록 제작되어 있다. 양성자 빔과 감속재료 사이 반응에 의해 발생한 열 제거 방식은 냉각수에 의한 간접냉각 방식이며, 쿼크 커넥터를 이용하여 쉽게 냉각수 라인 설치를 용이하게 하였다.

다. 빔 모니터

PIXE-PIGE 용 빔을 인출하기 위하여 빔 라인 중간에서 빔의 모양을 관찰하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 빔 라인 중간에 쉽게 설치하여 빔의 모양을 측정할 수 있는 빔 모니터를 설계하였다. 그림 38은 빔 전류 측정 장치의 설계 입체도면이다.

설계된 빔 모니터는 모두 10개의 구획으로 구분하여 빔의 모양 및 빔의 위치 등을 비교적 쉽게 측정할 수 있도록 설계하였다. 빔 라인 중앙으로 9개의 구리로 된 전극을 설치하고, 전극 후면에서 신호선을 연결할 수 있도록 설계하였으며, 전극 주위로 냉각수 라인을 설계하여 양성자와 반응에 의한 열을 간접적으로 제거할 수 있도록 설계하였다.

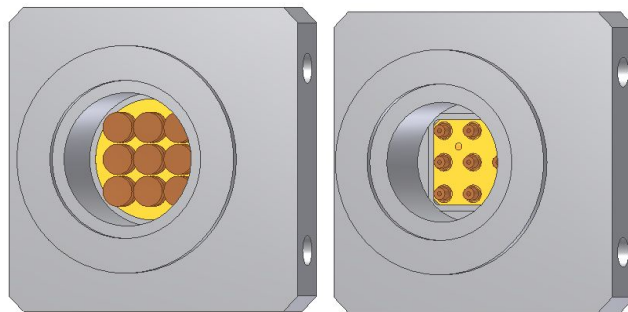


그림 38. 빔 전류 측정 장치 설계 입체도면

제작된 빔 모니터의 연결 커넥터 규격은 DN 50 으로 빔 라인 어느 곳에서든 설치가 가능하며, 클램프를 이용하므로 탈부착이 용이하게 제작되어졌다. 빔 모니터 내부에 설치되어 있는 각각의 구리 전극은 나사형태로 가공된 세라믹 재료에 의해 절연된다.

라. 빔 프로파일 챔버

KIRAMS-13 사이클로트론으로부터 인출된 양성자 빔은, 빔 라인에 설치된 분석용 전자석에 의해 필요한 에너지가 선택되어지고 집속용 전자석을 통과하면서 적절히 집속되면서 PIXE-PIGE 챔버 까지 이송된다. 빔 라인에 설치된 분석용 전자석 및 집속용 전자석을 통과한 양성자 빔의 전류량을 측정하기 위하여 Faraday Cup 을 설치하고, 최소한의 빔을 빔 라인으로 보내기 위한 collimator 를 하나의 챔버 내부에 삽입하여 공압 밸브로 컨트롤 할 수 있도록 설계하였다. 설계된 빔 프로파일 챔버 는 collimator 또는 Faraday Cup 등을 다른 종류로 교체하기 용이하게 설계하였으며, collimator 대신 beam 에너지 감속장치 도 교체하여 사용할 수 있도록 설계하였다. 그림 39는 빔 프로파일 챔버 설계도면이다.

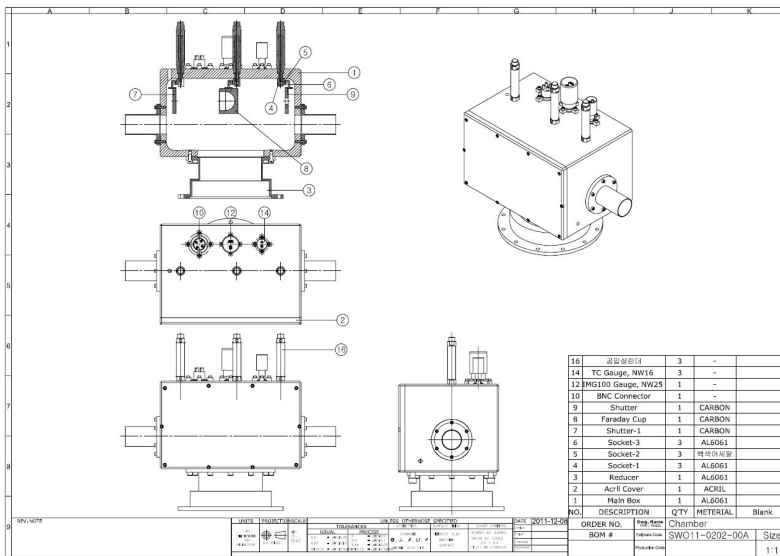


그림 39. 빔 프로파일 챔버 설계도면

제작된 빔 프로파일 챔버 는 빔 라인 Faraday Cup의 역할과 빔의 차단 및 빔의 모양을 만들어 주는 역할을 수행한다. 아울러 진공펌프가 설치되어 있어서 빔 라인의 진공도 유지 역할을 주로 수행한다. 설치 위치는 PIXE-PIGE 챔버 바로 전단에 위치하여 빔 조사용 노즐에 최종 빔을 제공하는 역할을 수행한다. 이 챔버에는 고진공도 및 저진공도를 측정할 수 있는 진공게이지가 설치되어 있어서 빔 라인의 진공도 상태를 모니터링 할 수 있으며, 챔버 커버를 두꺼운 아크릴로 설계하여 내부가 잘 들여다보이도록

하였다. 이 빔 프로파일 챔버는 내부 공간이 충분하여 내부에 Faraday Cup 뿐만 아니라 빔 조사용 표적장치를 장착해서 사용할 수 있도록 제작하였다.

마. 빔 라인 Faraday Cup 챔버

빔 라인 Faraday Cup 챔버 내부에는 흑연으로 구성된 Faraday Cup 이 설치되어 있으며, 상하좌우로 산란된 빔을 차단할 수 있는 Collimator 를 동시에 사용할 수 있도록 설계되어 있다. 공압 밸브 조작으로 actuator 실린더를 제어할 수 있도록 설계하였다. 빔 라인 Faraday Cup 구동장치의 특징으로는 Collimator 또는 Faraday Cup 등을 다른 종류로 교체하기 용이하게 설계하였다. 그림 40은 이에 대한 제작에 사용된 설계도면이다.

제작된 챔버에는 빔의 차단 및 빔 전류 측정을 담당하는 Faraday cup과 퍼진 빔을 잘라내기 위한 collimator가 장착되어 있다. Faraday cup과 collimator는 챔버 상부에 장착된 공압 구동장치에 의해 상하로 움직인다. 빔 인출 시에 Faraday Cup 은 상부로 올라가 있어 빔의 진행을 방해하지 않도록 되어 있으며, collimator는 하부로 내려와 빔의 형태를 사용자가 원하는 크기로 잘라내는 역할을 한다.

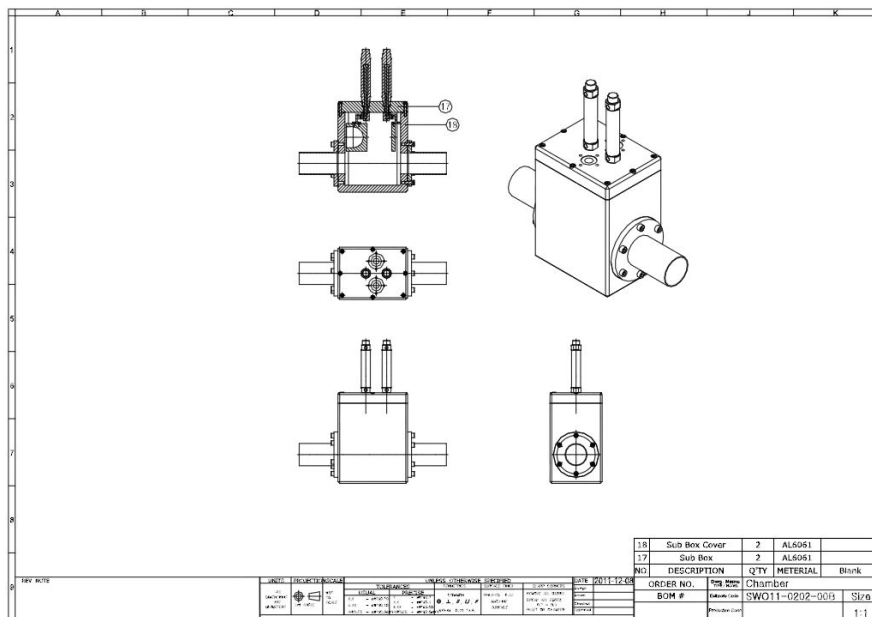


그림 40. 빔 라인 Faraday Cup 챔버 설계도면

바. PIXE-PIGE 챔버

본 연구를 통해서 설계된 PIXE-PIGE 챔버는 한국지질자원연구원에서 설치되어 있는 PIXE 분석용 챔버를 참고하여 설계하였다. 본 논문에서 설계한 PIXE-PIGE 챔버는 알루미늄을 사용하여 가공하였으며, 내부에는 Beam Collimator, Secondary Electron Suppressor, Electron Supplier, Target Mount, Target Moving System, CCD Camera, View Port, Signal Cable Connection Port, Faraday Cup 등이 설치되어 있다. 그림 41은 실제 제작에 사용된 설계도면이다.

PIXE-PIGE 챔버 설계 시 중점적으로 고려되었던 사항은 X-선 분석을 위한 Si(Li) 검출기와 분석용 챔버 내부의 진공 경계설계, 그리고 양성자와 표적과의 반응에서 발생하는 2차 전자 억제설계 등 이었다. PIXE-PIGE 분석에서 중요한 점은 저에너지 X-선을 측정하여야 하므로 양성자 조사 시료로부터 방출되는 X-선이 검출기 표면까지 도달하는데 있어 가능한 차폐가 되지 않도록 설계하는 것이다. 따라서 Si(Li) 검출기가 장착되는 Port의 진공경계 벽에 대한 설계는 중요하다. 이 부분은 O-링과 얇은 플라스틱 필름으로 진공을 유지할 수 있도록 설계하였다.

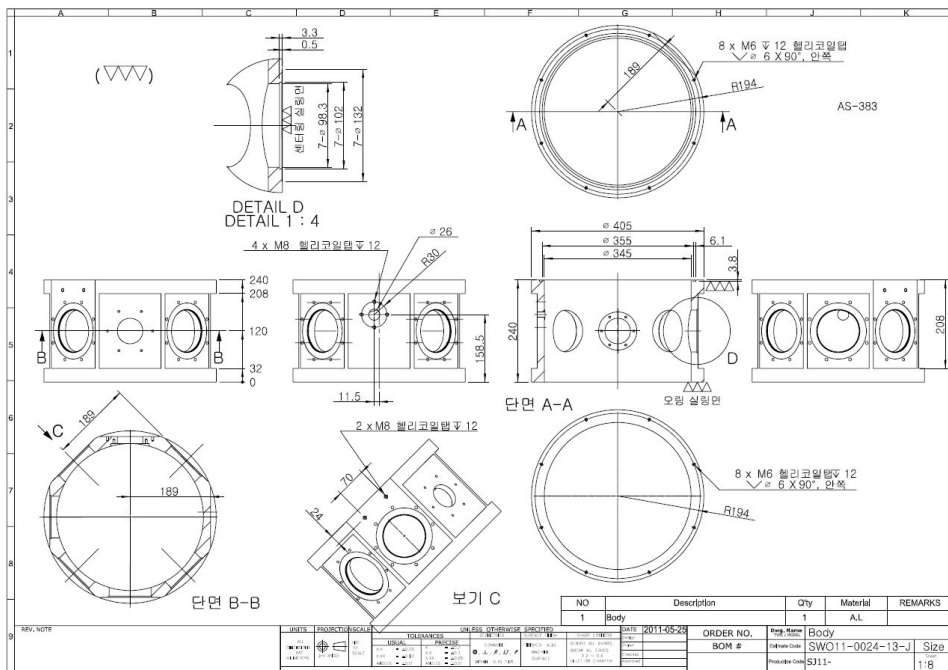


그림 41. PIXE-PIGE 챔버 설계도면

다음으로 양성자가 표적에 입사하면서 발생하는 2차 전자에 관한 사항이다. 이 과정에서 발생하는 2차 전자는 직접 X-선 검출기에 입사되어 정확한 방사선 정보를 얻을 수 없게 하는 인자로서 반드시 제거해야만 한다. 이를 위해 2차 전자 억제제 (Secondary Electron Suppressor)라고 일컫는 부품 설계가 필요하다. 이 2차 전자 억제는 시료 표면에서 X-선 검출창과의 사이에 위치하고, 검출기 입사창의 크기만큼 구멍을 뚫은 다음, 전기적으로 음극로 대전시키면 뚫려 있는 그 구멍을 통해 표적에서 발생하는 X-선은 검출기로 입사되며, 2차 전자는 전기적인 반발력으로 검출기로의 입사를 차단하는 역할을 한다.

PIXE-PIGE 챔버는 알루미늄 덩어리를 깎아서 제작하였으며, X-선 분석용 Si(Li) 검출기와 감마선 분석용 HPGe 검출기를 동시에 설치할 수 있도록 설계하였다. 빔 조사용 표적 장치는 스텝 모터로 제어하며, 6 개의 시료를 장착한 후 빔을 조사할 수 있도록 설계하였다. 또한 양성자와 표적 시료와의 반응을 관찰할 수 있도록 View port를 설치하여 화상카메라를 통해 영상 수집 및 실험자가 유관으로 관찰할 수 있도록 설계하였다.

제작된 챔버는 정 8면체로 각 면마다의 용접이 아닌 알루미늄 덩어리를 직접 가공·제작하여 진공유지에 용이하도록 제작하였다. 진공 중에 있는 PIXE-PIGE 챔버 내·외부를 연결시킬 수 있는 면이 총 8개로 빔 수송단과 연결되는 포트와 챔버 내로 입사된 빔을 계측하는 Faraday Cup 장착 포트가 빔이 들어오는 직선방향으로 설치되어 있다. 빔의 입사 방향에서 좌우측으로 X-선 검출기 및 감마선 검출기가 시료에 최대한 가깝게 설치될 수 있도록 각각의 포트가 설치되어 있으며, 이 포트의 방향은 빔 방향에서 양쪽 좌우로 45° 각도를 유지하게 된다. PIXE-PIGE 챔버의 내부에는 빔 크기 조절 collimator 노즐이 있으며 노즐 좌우측으로 X-선 검출기와 감마선 검출기가 위치한다. 빔 노즐은 두 개의 collimator 를 장착할 수 있으며, 두 collimator 의 간격은 5mm 간격으로 되어 있어 최대 100 mm 에서 최소 5 mm 까지 조절할 수 있다. 빔 노즐 정면에 위치한 표적은 6개의 시료를 장착하여 구동장치에 의해 조작될 수 있도록 제작되었다. X-선 검출기용 어댑터는 PIXE 분석 시 시료에서 발생하는 X-선을 최대한 통과시키기 위하여 얇은 필름을 이용하여 외부와의 진공을 유지하도록 설계되어 있다. 진공 경계면에 사용되는 진공유지 필름들은 얇은 mylar 필름 또는 폴리에틸렌 필름 등을 사용할 수 있다. 감마선은 X-선에 비해 상대적으로 투과력이 강하므로 별도의 진공유지를 위한 필름을 사용하지 않고, 어댑터 전체를 하나의 구조체로 제작하여 진공을 유지하도록

록 설계·제작 하였다.

빔 조사용 표적장치와 X-선 검출기 사이에는 2차 전자 억제장치가 설치되어 있다. 시료에 양성자 빔이 조사되면 시료에서는 시료 원소에 따른 특성 X-선 뿐만 아니라 2차 전자가 발생한다. 이때 발생하는 2차 전자는 X-선 검출기로 입사되어 분석하고자 하는 원소의 특성 X-선 스펙트럼의 백그라운드로 작용하여 검출효율을 감소시키는 역할을 한다. 시료에서 발생하는 2차 전자는 이 2차 전자 억제장치에 -150 V 정도의 전압을 가하여 전기적인 반발력으로 전자를 제거하는 원리이다.

PIXE-PIGE 챔버 에 설치되어 있는 Faraday Cup 은 빔 조사용 표적장치 후면에 설치되어 있으며, 빔 입사각과 일직선상에 위치하여 시료에 조사되는 빔 전류량을 측정할 때 사용한다. 이 Faraday Cup 에 연결된 빔 전류 수집 장치의 측정범위가 1fA ~ 20mA 로 시료에 조사되는 양성자의 조사량을 정밀하게 측정한다. 이 Faraday Cup 내부에 삽입된 내부 파이프의 길이는 20 cm 로 충분히 길어서 양성자 빔이 Faraday Cup 에 입사된 후 Faraday Cup 재료와 탄성산란에 의해 다시 튀어나가는 것을 방지하여 정확한 빔 전류 측정이 이루어질 수 있도록 설계되어 있다. 또한 양성자와 시료와의 반응에서 발생하는 2차 전자가 Faraday Cup 으로 입사되는 것을 방지하기 위하여 이 Faraday Cup 에도 2차 전자 억제장치가 장착되어 있다.

양성자 빔을 조사시키기 위한 표적장치에는 6개의 시료를 장착할 수 있다. 표적장치는 본 연구를 통해 개발된 빔 조사용 표적장치 제어 프로그램으로 제어되며, 시료의 규격은 직경 23 mm 정도로 제작되어야 장착하기 용이하지만 더 작은 크기의 시료도 지지대를 이용하여 지지할 수 있으므로 시료의 크기는 크게 중요하지 않다.

사. 빔 평활화 장치

빔 수송라인에서 빔의 크기를 결정해 주는 장치가 빔 평활화 장치이다. 이 장치는 빔이 지나가는 중앙의 직경이 20 ~ 30 mm 의 구멍을 중심으로 독립된 4극의 흑연블록을 가공하여 제작하였다. 양성자 빔과 흑연블록 간의 반응에 의해 발생한 열은 간접 냉각 방식으로 제거하였다. 빔 평활화 장치의 설치 위치는 90도 횡용 전자석을 중심으로 90도 횡용 전자석 전단과 후단에 각각 1개가 설치되었고, 3중 집속 전자석 전단에 1개가 설치되어 빔 수송 중 퍼지는 빔을 잘라내는 역할을 한다. 또한 이들 빔 평활화 장치의 상하좌우 각각 독립된 4극 흑연블록은 설치된 위치에서 빔 전류를 측정할 수 있으므로

빔 수송 중 빔의 진행방향을 측정하는 역할을 담당한다.

아. X-선 및 감마선 검출기

PIXE 분석용 X-선 검출기는 Canberra 사의 Si(Li) 검출기로 사양을 결정하였다. 표 8 은 X-선 검출기의 사양이다. 최근에 제작되는 검출기는 5.9 keV 에서 FWHM 값이 0.16 keV로 분해능이 매우 우수하여 저에너지 X-선 측정에 적합하였다.

표 8. X-선 검출기 주요 사양

구 분	물리적 특성
Active diameter	3.9 mm
Resolution(eV) FWHM @ 5.9 keV	0.160 keV
Active Area	12.5 mm ²
Window thickness	0.025 mm
Window material	Beryllium

PIGE 분석을 위하여 HPGe(고순도 게르마늄) 검출기로 결정하였으며, 제작사는 X-선 검출기와 동일한 Canberra사 이다. 표 9는 감마선 검출기의 사양이다. 검출기의 검출 효율이 15%로 다소 낮은 경향은 있으나 PIGE 분석용으로는 충분한 사양이며, 분해능이 1332 keV에서 1.8 keV로 충분히 좋다.

표 9. 감마선 검출기 주요 사양

구 분	물리적 특성
Efficiency	≥ 15%
Resolution(eV) FWHM @ 1332 keV	≤ 1.8 keV
Active diameter	53.2 mm
Length / Thickness	34.1 mm
Distance from window	4.98 mm

4. 이온빔 수송계통 구성품 설치

가. 전자석 및 전원공급장치

(1) 사이클로트론 및 전자석 설치

PIXE-PIGE 분석 시스템의 빔 라인은 사이클로트론의 빔 인출 방향과 서로 직각인 방향으로 설계되어 있다. 따라서 빔 라인에 직각으로 사이클로트론의 방향을 조정하는 과정에서 발생하는 충격에 의해 사이클로트론 내부 부품들의 변형을 방지하기 위하여 일부 부품을 분해하여 사이클로트론의 방향을 전환 시킨 후 재조립을 수행하였다. 사이클로트론의 방향을 전환하고 재조립 완료 후 이에 따른 빔 튜닝과정을 거쳐 사이클로트론을 정상운전 상태로 복구시켰다.

사이클로트론으로부터 인출된 양성자 빔을 PIXE-PIGE 챔버와 수직방향으로 회전시키기 위하여 90도 휨용 전자석을 설치하고, 이를 통과한 빔은 좌우로 퍼지는 현상이 강하기 때문에 이 빔을 PIXE-PIGE 챔버 까지 최대한 수송하기 위해서 집속용 전자석을 설치하였다.

집속용 전자석은 2중 4극 전자석 과 3중 4극 전자석 순서로 설치하였다. 각각의 집속용 전자석 입구에 90도 휨용 전자석을 지난 빔이 집속용 전자석 빔 튜브에 적절히 입사될 수 있도록 조절용 전자석을 설치하였다.

90도 휨용 전자석은 입사면이 사이클로트론의 빔 인출 포트와 수직방향으로 배치하고 사이클로트론으로부터 거리는 1,800 mm 를 유지하였다. 집속용 2중 4극 전자석 은 90도 휨용 전자석과의 거리를 760 mm 정도 유지하였으며, 2중 4극 전자석 과 3중 4극 전자석 의 거리는 1,050 mm 를 유지하였다. 이러한 거리는 빔 옵틱스 계산 결과에 따라 사이클로트론으로부터 PIXE-PIGE 챔버 까지 최대한 빔을 수송하기 위해 전자석 배치거리를 정확하게 일치시켰다.

빔 모니터의 위치는 90도 휨용 전자석 과 2중 4극 전자석 사이, 2중 4극 전자석 과 3중 4극 전자석 사이, 그리고 3중 4극 전자석 과 PIXE-PIGE 챔버 사이에 각각 설치하여 빔 인출과정에서 빔 전류를 모니터링 하였다.

빔 라인의 컴포넌트들은 시준기를 이용하여 정렬하였다. 이와 같은 방법으로 4극 전자석, 빔 모니터, 빔 라인 Faraday Cup, 빔 프로파일 챔버, PIXE-PIGE 챔버 등의 정렬

을 수행하였다. 그림 42는 사이클로트론 vault 내부에서 바라본 이온빔 수송계통 구성품의 설치된 상태를 보여준다.

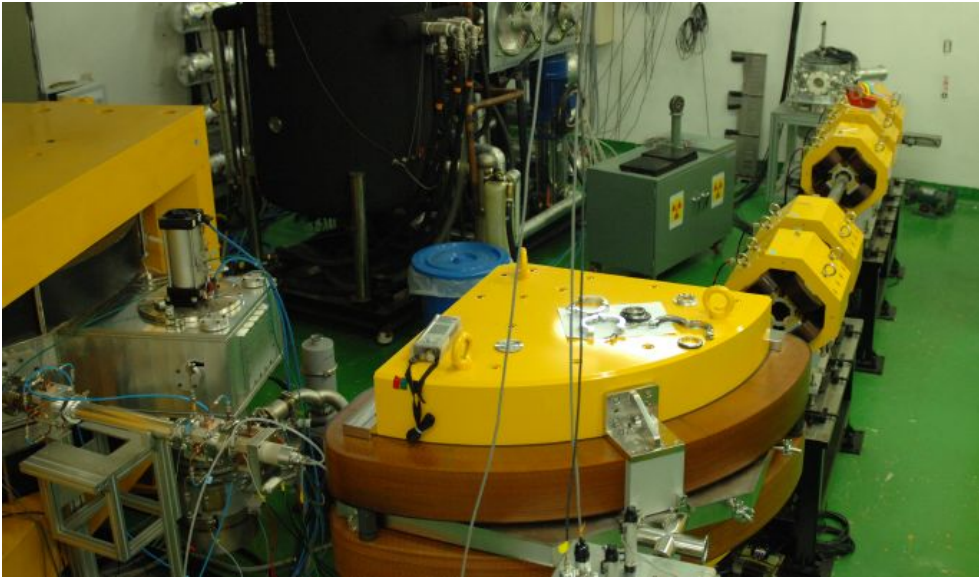


그림 42. 이온빔 수송계통 구성품 설치

(2) 전자석 성능테스트

PIXE-PIGE 분석용 빔 라인에 설치된 전자석에 대한 자장을 측정하여 각각의 전자석에 대한 전자석 효율 분석을 수행하였다. 전자석에서 실제 발생하는 자장은 이론적으로 계산된 전자석의 자장에 비해 작게 나타난다. 이는 전자석 요크 내에 발생하는 자기포화 및 자기누설 등에 의한 효과 때문으로 분석되었다.

빔 라인에 사용하기 위하여 제작된 전자석에 대해 우선적으로 자장을 측정하였다. 그리고 측정된 자장 값을 이용하여 전자석의 효율을 유도하였다. 표 10은 90도 횡용 전자석의 자장을 측정한 값과 계산된 자장 효율이며, 그림 43은 자장 효율을 그래프로 나타낸 것이다.

여기서, 계산된 자장 대비 측정된 자장의 비율을 efficiency라고 정의한다. 설계 및 제작이 잘된 전자석의 efficiency는 그럴지 못한 것보다 높는데 전자석의 전력 효율이 높은 것으로 해석한다. 평가된 efficiency로 빔 에너지 별 전자석의 필요 전류량을 계

산하는데 정확한 값을 얻었다.

표 10. 90도 횡용 전자석 자장 및 자장효율

전류(A)변화에 의한 자장측정값 좌표 : (0 , 0)

전류(A)	측정 자기장(gauss)	계산 자기장	efficiency
5	602	604.6975333	0.995539
10	1202	1209.395067	0.993885
15	1795	1814.0926	0.989475
20	2391	2418.790133	0.988511
25	2986	3023.487667	0.987601
30	3576	3628.1852	0.985617
35	4165	4232.882733	0.983963
40	4754	4837.580266	0.982723
45	5334	5442.2778	0.980104
50	5910	6046.975333	0.977348
55	6453	6651.672866	0.970132
60	6961	7256.3704	0.959295
65	7422	7861.067933	0.944147
70	7847	8465.765466	0.92691

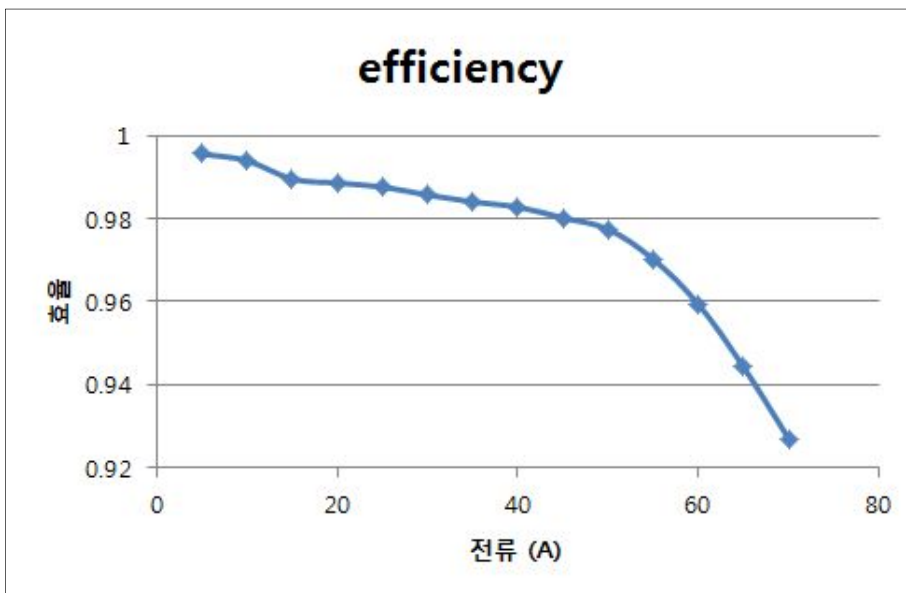


그림 43. 90도 횡용 전자석 효율분석 결과

90도 횡용 전자석 및 집속용 전자석에 대한 효율은 다음과 같이 계산하였다. 계산결과 90도 횡용 전자석의 효율은 60A 이상의 입력전류 영역에서 92% 이상의 효율을 보여 적절히 제작되었으며, 집속용 전자석의 효율은 설계 전류 전체영역에서 82%의 안정된 효율을 보여주었다.

· 90도 횡용 전자석 효율계산식

$$\eta = \frac{B_{measured}}{B_{theory}} = B_{measured} \cdot \frac{2NI\mu_0}{h}$$

N : pole 당 코일의 감긴횟수 (=320 회)

I : 전원공급장치에서 코일로 흐르는 전류

μ_0 : 진공에서의 투자율 ($=4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

h : 90도 횡용 전자석의 gap 크기 (=6.65cm)

· 4극 전자석 효율계산식

$$\eta = \frac{B_{measured}}{B_{theory}} = B_{measured} \cdot \frac{2NI\mu_0}{r}$$

N : pole 당 코일의 감긴횟수 (=100 회)

I : 전원공급장치에서 코일로 흐르는 전류

μ_0 : 진공에서의 투자율 ($=4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

h : 4극 전자석의 gap 크기 (=3cm)

(3) 전자석 전원공급장치 설치 및 성능테스트

빔 라인 전자석의 전류를 입력시키는데 사용하는 전원공급장치를 설계·제작 하였다. 사이클로트론에서 인출된 양성자의 에너지에 따른 90도 횡용 전자석에 공급할 공급전류에 대한 계산은 다음과 같은 방법으로 계산하였으며, 빔 인출 시 전자석을 제어하는 데이터로 활용하였다.

$$B\rho = \frac{1}{qc} \sqrt{T^2 + 2TE_0}$$

여기서,

q : 입자의 전하량

c : 광속(m/s)

T : 빔의 운동에너지(eV)

E₀ : 입자의 정지질량 에너지(eV), 양성자의 경우 938 MeV

$$B = \frac{B\rho}{r_M}$$

여기서,

B : 자기 유도(T, Gauss)

r_M : 90도 횡용 전자석의 회전 반지름(m)

$$NI_{(per\ pole)} = \frac{Bh}{2\eta\mu_0}$$

여기서,

h : 전자석 갭(m)

H : 자기장(Vector)(A/m, Oersted)

η : 자장효율(전형적으로 99%)

μ₀ : 자유 공간의 도자율 : 4 π × 10⁻⁷ (Vs/Am)

μ_r : 상대적 도자율 : μ_{air} = 1, μ_{iron} > 1000

전원공급장치 전류는 전자석의 자장발생 효율이 99% 정도로 계산되어 이를 이용하여 산출하였다. 표 11에 에너지에 따른 90도 횡용 전자석 공급전류 계산결과이며, 이를 그림 44에 그래프로 나타내었다. 계산 결과, 사이클로트론에서 인출된 빔의 에너지를 전혀 변화시키지 않은 13 MeV 양성자 빔에 대해 전원공급장치의 전류로는 58.2 A 정도로 나타났다. 90도 횡용 전자석 전원공급장치의 성능을 최대 60 A 까지 높이고, 약 4 시간 정도 운영한 결과 shot-down 없이 지속적으로 운전 가능하였다.

표 11. 에너지에 따른 90도 횡용 전자석 공급전류 계산결과

에너지 [MeV]	Br [Tm]	B [T]	NI	전원장치 공급전류 [A]
13	0.522788	0.697051	18629.92	58.21848746
12	0.502145	0.669527	17894.31	55.91971068
11	0.48064	0.640854	17127.96	53.52487007
10	0.458151	0.610868	16326.54	51.02044077
9	0.434525	0.579367	15484.61	48.38940895
8	0.409566	0.546088	14595.16	45.60987313
7	0.383012	0.510683	13648.9	42.65280804
6	0.354506	0.472675	12633.07	39.47834289
5	0.323532	0.431376	11529.3	36.02905854
4	0.289299	0.385732	10309.38	32.21680452
3	0.250474	0.333965	8925.809	27.89315254
2	0.204457	0.272609	7285.953	22.76860374
1	0.144534	0.192712	5150.575	16.09554779

빔 인출 에너지에 따른 MPS 공급전류(A)

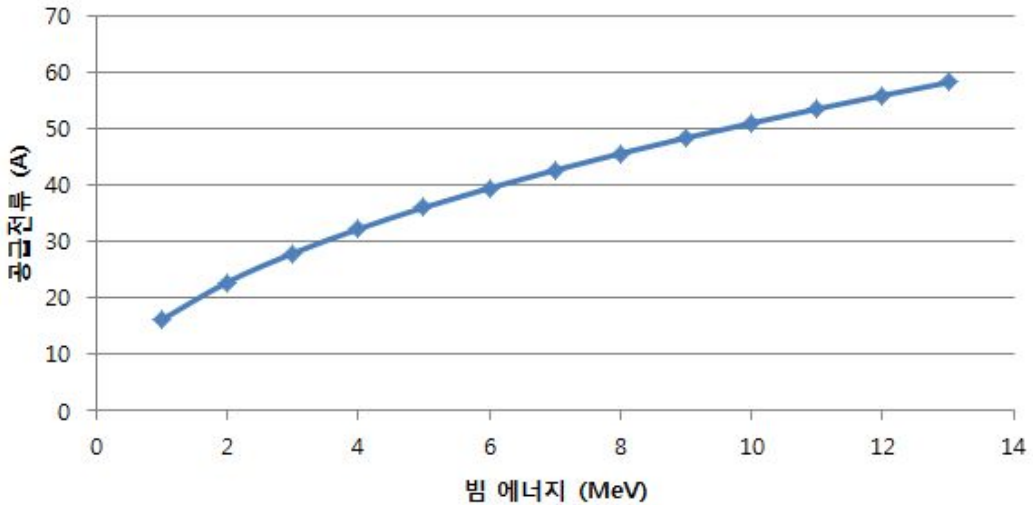


그림 44. 빔 라인 인출 빔의 에너지에 따른 입력전류

나. 빔 에너지 감속장치

빔 에너지 감속을 위해 사용된 흑연 박막은 에너지 감속장치 내부의 원통형 흑연 블록 사이에 위치하며, 흑연 박막 한 장의 두께는 0.25mm 이다. 본 실험에는 아무것도 설치하지 않은 상태와 1 장의 흑연 박막을 설치한 상태, 그리고 2 장의 흑연 박막을 설치한 상태 등으로 3 가지로 구분하였으며, 박막의 두께로는 0mm, 0.25mm, 0.5mm 등이 사용되었다.

빔 에너지 감속장치의 정확한 설치 위치는 가속기로부터 직선 방향으로 빔의 크기를 설정할 수 있도록 직경 20 mm 의 quadrant 를 설치하고, 90도 횡용 전자석 챔버 입구에 설치하여, 에너지가 감속된 빔을 90도 횡용 전자석에 바로 입사하여 전자석의 자장 전류를 입력함으로써 빔 에너지를 선택할 수 있도록 배치하였다. 표 12에는 실험에 사용된 흑연 박막의 사양을 제시하였다.

표 12. 에너지 감속재용 흑연 박막 사양

구 분	단 위	데 이 터
밀도	g/cm ³	1.0
비저항	μ Ω m	6 - 8 (in plane) 600 - 700 (through plane)
인장강도	N/mm ²	≥4
경도	Shore	30.0
열팽창	× 10 ⁻⁶ /K	1 (in plane) 30 (through plane)
열전도성(20℃)	W/K.m	180 - 200 (in plane) 4 - 6 (through plane)

그림 45는 흑연 박막 두께를 3가지(0, 0.25, 0.5mm)로 변경시키면서 90도 횡용 전자석의 자장 전류를 인가시켰을 경우, 90도 횡용 전자석의 직각 방향에 설치된 타겟에서 빔 전류가 최대값으로 관측되는 시점에서 전자석에 인가된 자장 전류 값의 변화를 나타낸 것이다. 실험결과, 흑연 박막을 장착하지 않았을 경우에는 안정된 자장 전류 값이 55.2 A를 보였으며, 0.25mm 흑연을 설치한 후 안정된 전류를 보이는 자장 전류 값은 52.9 A를 보였다. 또한 0.5mm 흑연 박막을 설치한 경우에는 50.9 A의 자장 전류 값을 보였다. 이는 흑연 박막으로 인하여 가속기로부터 인출된 빔의 에너지가 감쇄되는 현상을 보여 주었다.

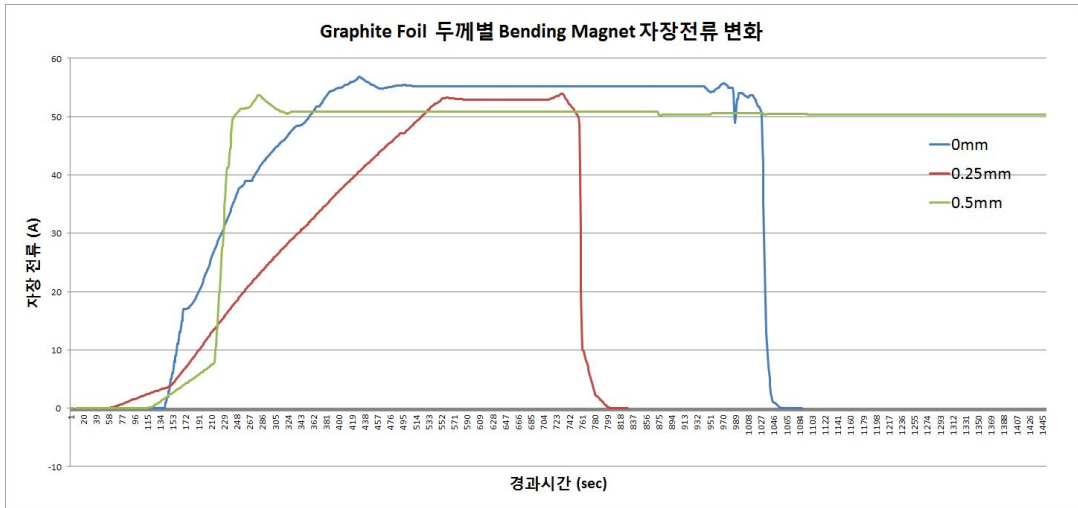


그림 45. 흑연 박막 두께별 90도 휨용 전자석의 자장 전류 측정결과

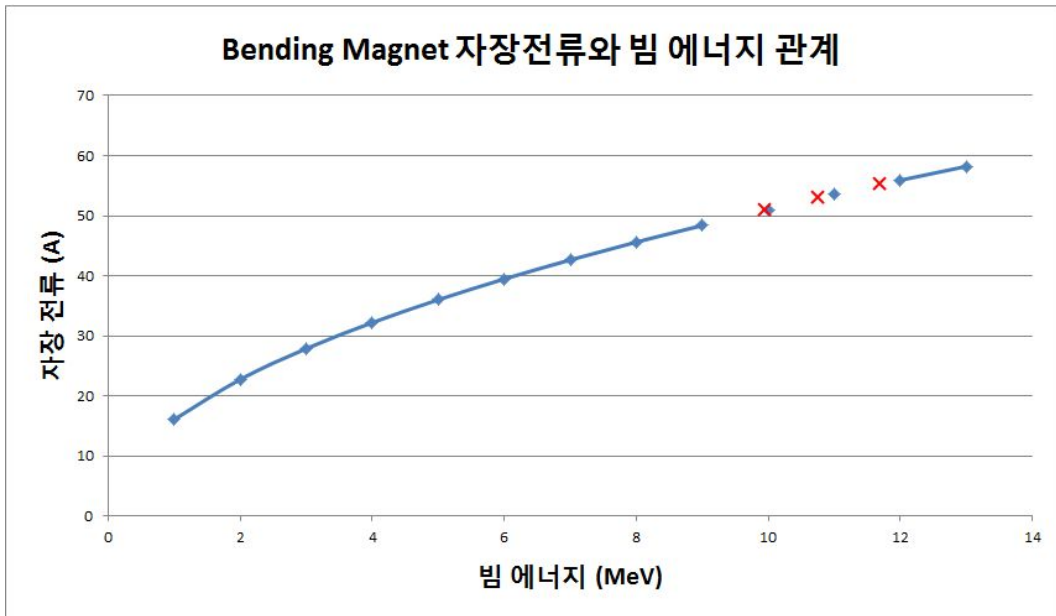


그림 46. 90도 휨용 전자석 자장 전류에 따른 빔 에너지 측정결과

흑연 박막 두께별 90도 휨용 전자석의 자장 전류 값의 변화는 빔 에너지의 변화와 관계되는데, 90도 휨용 전자석의 자장 효율을 알고 있고, 전자석 내 빔의 회전반경

및 기타 전자석의 설계 값을 알면 다음 식에 의해 빔의 에너지를 계산할 수 있다.

본 실험에서는 전자석에 인가된 전류 값에 의해서 빔의 에너지를 산출할 수 있었다. 흑연 박막을 통과한 빔의 에너지를 산출한 결과, 0mm, 0.25mm, 0.5mm 각각의 흑연 박막을 통과한 빔의 에너지는 11.7 MeV, 10.75 MeV, 9.95 MeV로 계산되었다. 각 실험별 측정된 빔의 에너지는 그림 46과 같이 나타났다. 이 그래프는 90도 횡용 전자석의 자장 전류 값에 대한 양성자 빔 에너지 관계식에 의한 것이다.

다. 빔 모니터

빔 전류 측정을 위한 빔 모니터는 2중 4극 전자석 후단과 3중 4극 전자석 후단에 설치하여 빔 인출 실험 시 빔 전류를 측정하였다. 빔 전류 데이터 수집을 위하여 빔 라인 전자석 제어 프로그램에 빔 전류 측정값을 표시할 수 있도록 설계하였다. 빔 라인 전자석 제어 프로그램 내에서 빔 전류 측정 장치의 위치는 실험자에 의해 쉽게 이동할 수 있도록 설계하여 빔 조사 중 빔의 퍼짐상태 및 빔 전류 측정값을 유관으로 쉽게 관찰할 수 있게 제작하였다.

빔 라인 제어 프로그램 상의 빔 전류 표시 방법은 움직이는 그래프 모양을 하고 있다. 따라서 양성자 빔과 빔 모니터의 전극이 반응할 시 프로그램 상의 빔 모니터 그래프가 상하로 움직이면서 사용자에게 실시간 빔 전류 정보를 제공한다.

빔 모니터의 동작여부를 실험하기 위하여 90도 횡용 전자석과 2중 4극 전자석 등이 표현될 수 있도록 하였다. 가속기 및 빔 라인 제어 시 각종 데이터 수집 프로그램을 통해 90도 횡용 전자석의 자장 전류 값과 2중 4극 전자석 또는 3중 4극 전자석의 자장 전류 값을 실험자 임의로 저장할 수 있으며, 자장 전류와 빔 전류와의 관계를 쉽게 그래프로 확인할 수 있도록 90도 횡용 전자석의 자장 전류 값이 저장되는 시간동안 빔 전류 측정 장치에 수집되는 빔 전류 값도 동시에 저장될 수 있도록 하였다.

라. PIXE-PIGE 빔 조사 시스템

(1) PIXE-PIGE 챔버 및 검출기

PIXE-PIGE 챔버에 X-선 검출기를 장착시키는 방법으로 검출기 지지대의 레버를 조종

하여 검출기를 전후 방향으로 움직이면서 PIXE-PIGE 챔버 내로 삽입 또는 사출하는 방법으로 제작하였다.

X-선 검출기는 검출기 창이 얇은 베릴륨으로 되어 있어 파손의 위험이 존재하므로 검출기 삽입 시 주의하여야 한다. PIXE-PIGE 챔버에 장착된 감마선 검출기 장착 시스템은 X-선 검출기와 동일한 조작방법이 사용된다. PIXE-PIGE 챔버 내부에 삽입되어 있는 감마선 검출기 어댑터는 진공창이 없는 일체형이므로 검출기의 삽입 시 진공창의 손상 우려가 없다.

(2) 빔 조사용 표적장치

PIXE-PIGE 분석용 빔 라인에는 빔 조사용 표적장치가 반드시 필요하다. 빔 조사용 표적장치는 표적 구동장치를 사용하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 전환시키는 구조로 제작하여 시료를 횡 방향으로 6개까지 배열하여 사용자가 원하는 표적을 선택할 수 있도록 제작하였다. 또한 표적 구동장치의 스텝 모터에는 엔코더를 부착하여 모터의 회전 정도를 모니터링 하므로 표적의 위치 정보를 정확하게 기억하여 사용자의 선택에 따라 원하는 시료 번호를 선택할 수 있다.

빔 조사용 표적장치 제작 시, 표적 구동장치와 PIXE-PIGE 챔버 사이의 진공도 유지는 중요하며, 자석을 이용한 모터 회전체를 이용하는 방법이 사용되었다.

마. 빔 라인 및 PIXE-PIGE 분석 시스템

PIXE-PIGE 분석을 위한 시설은 사이클로트론실과 PIXE-PIGE 분석 실험실로 나뉜다. 두 공간은 1.5m 콘크리트 벽으로 차폐되어 있으므로 PIXE-PIGE 분석 시 사이클로트론 가동에 의한 백그라운드는 전혀 고려하지 않아도 된다. 사이클로트론실에는 전자석과 빔 모니터, 그리고 Faraday Cup 챔버 등이 설치되어 있으며, PIXE-PIGE 분석 실험실에는 빔 프로파일 챔버, PIXE-PIGE 챔버, 그리고 각각의 검출기가 설치되어 있다. 이들은 모두 가속기 및 빔 라인 통합 제어 프로그램에 의해 제어된다.

제 3 절 가속기 및 빔 라인 통합 제어 프로그램 개발

1. 가속기 제어 프로그램

PIXE-PIGE 분석 시스템을 운영하기 위해서는 가속기와 빔 라인을 동시에 운영할 수 있는 프로그램이 필요하다. 국산 사이클로트론의 운전 프로그램을 간결하게 제작하기 위해서 컴퓨터 내부에 장착하는 통신 보드를 제거하고, 사이클로트론 각각의 부품의 통신을 통합하는 장치를 개발하였다. 각 장치의 통신을 통합시키는 장치로 MOXA 사의 Serial Device Server 를 사용하여, 사이클로트론을 제어하는 각 장치에서 출력되는 RS-232 및 RS-422/485 신호를 RJ-45 커넥터 형식으로 변환시키는 PC 인터페이스를 구현하였다. 사이클로트론 운전 프로그램의 기반 프로그램으로 NI사의 LabVIEW 2015 버전을 사용하였으며, 컴퓨터의 사양으로는 Pentium 급 이상의 PC는 모두 설치 가능하도록 개발하였다. 운영환경은 Windows XP 이상의 환경에서 구현이 가능하다.

가속기 제어 프로그램 개발 시 사용되는 LabVIEW 프로그램에서 가장 중요시 되는 부분이 동기화 문제이다. 기존 프로그램은 다중의 while 루프들과 로컬변수들의 사용은 이러한 동기화 및 프로그램의 안정성에서 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 이러한 문제를 해결하기 위하여 프로그램을 메인과 서브 루프의 형태로 구성하였다. 아울러 프로그램 흐름의 동기화를 위하여 알림자와 큐를 사용하여 동기화된 프로그램이 가능하도록 하였다. 그림 47은 기존 사이클로트론 운전 프로그램의 구조이다. 이러한 다중 while 루프 구조는 각 변수의 값의 변경 시점을 정확하게 예측하기가 어렵다. 하지만 그림 48과 같이 마스터와 슬레이브 패턴 구조의 개선된 프로그램은 이러한 문제점을 방지 할 수 있다.

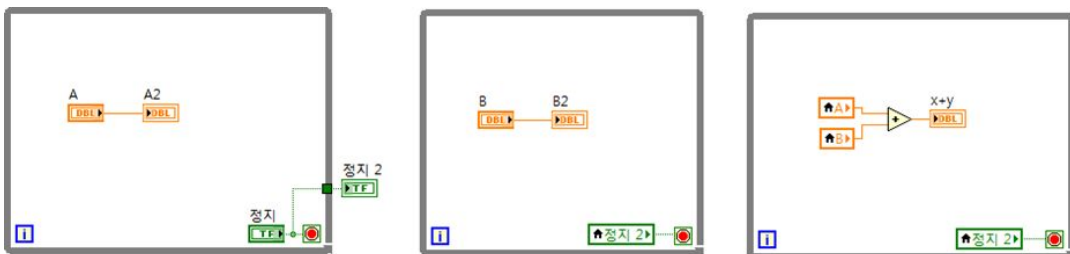


그림 47. 다중 while 루프를 이용한 프로그램 구조

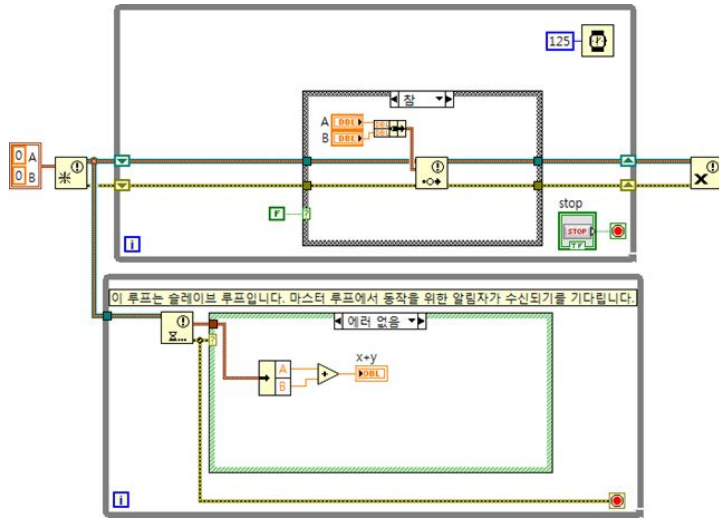


그림 48. 마스터와 슬레이브 패턴 구조를 이용한 프로그램 구조

본 연구를 통해 개발된 가속기 운전 프로그램의 최대 장점으로서는 원격지(인터넷이 가능한 곳)에서 최대 4대의 컴퓨터가 동시 접속이 가능한 원격 제어기능이다. 이는 사이클로트론 운전 중 문제가 발생했을 경우 사이클로트론 운전자와 프로그램 개발자가 사이클로트론 운전 프로그램에 동시 접속하여 프로그램 고장을 진단할 수 있다. 또한 사이클로트론 운전 작업이 PIXE-PIGE 분석 실험실과 동일한 장소에서 이루어지므로, 가속기의 원격제어를 통해 PIXE-PIGE 분석 시 발생할 수 있는 방사선 피폭으로부터 사이클로트론 운전자를 보호할 수 있게 개발하였다.

이와 같은 프로그램과 장비와의 통신을 위해서 PC에 별도의 통신 장비를 설치할 필요성이 없다. PC에 기본적으로 장착되어 있는 Ethernet 포트를 이용하여 사이클로트론 전체 시스템을 통합 운영이 가능하도록 하였다. 이 기능은 사이클로트론 통신 장치의 단품 및 업그레이드 필요성에 대한 문제를 해결할 수 있도록 하였다. 또한 사이클로트론 운전 중 각 장치의 가동 상태를 운전자가 일괄적으로 모니터링 할 수 있도록 프로그램 시작 창을 설계하여, 사용자는 메인 화면의 그래프를 통하여 각 장치의 상태확인 및 제어가 가능하다.

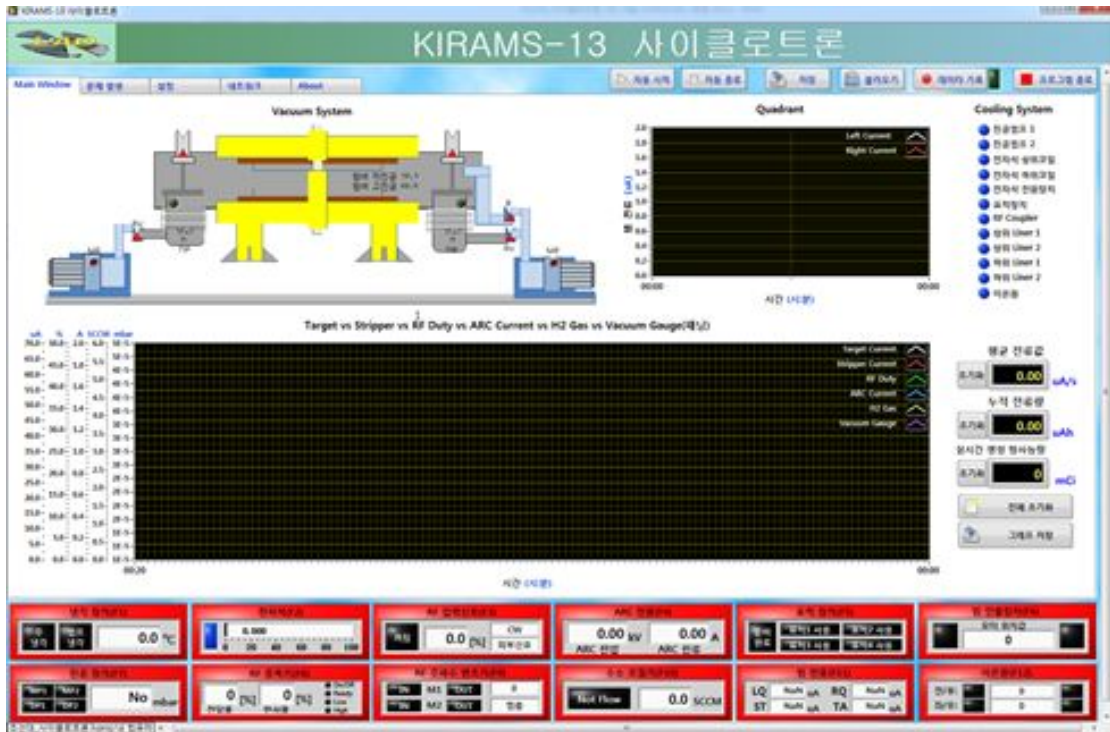


그림 49. 가속기 제어 프로그램

본 연구에서 개발한 사이클로트론 운전 제어 프로그램은 가속기의 안정적인 운전을 유도하고, 기타 시스템 설비 추가 및 유지보수가 용이하도록 개발하여, 빔 라인 설치에 따른 시설 추가 시 프로그램의 수정도 단순하다. 그림 49는 가속기 운전 제어 프로그램의 초기화면이다. 초기화면에는 가속기 운전변수를 표시하도록 하였으며, 탭 기능을 이용하여 빔 라인 컨트롤 장치, 빔 전류 수집 및 제어장치 등을 추가하기 쉽도록 만들었다.

2. 빔 라인 구성품 운전 제어 프로그램

가. 전자석 제어 프로그램

빔 라인 전자석 전원공급장치를 제어하기 위해서는 별도의 제어 컴퓨터를 운영하여야

만 한다. 따라서 본 연구에서는 가속기 제어 프로그램에 빔 라인 전자석 전원공급장치의 제어기능을 추가시켜서 가속기 운전과 동시에 전자석 제어 시스템이 운영될 수 있도록 프로그램을 설계하였다. 그림 50은 빔 라인 전자석 전원공급장치의 제어 창을 나타낸 것이다. 제어 창에서는 각각의 전자석 전원관리 및 자장 전류입력, 데이터 저장 등을 수행할 수 있으며, 전자석 자장 전류제어에 따른 양성자 빔 전류를 측정할 수 있도록 하였다. 빔 라인 각 구간에 설치되어 있는 quadrant 를 도식화 하여 제어 프로그램 상에 표시하였으며, 이는 전자석 자장 전류 값의 변화에 따라 빔 전류의 변화 양상을 운전자가 유관으로 모니터링 할 수 있도록 설계하였다.

빔 라인 전자석 제어프로그램은 가속기 제어 프로그램과 동일한 프로그램 내에 통합하여 가속기 제어와 마찬가지로 서로 다른 운전자에 의해서 동시에 제어될 수 있다. 물론 가속기 운전자 1인에 의해서도 가속기 및 빔 라인 전자석 제어 프로그램을 운영할 수도 있다. 그러나 안정적인 빔 조사를 위해서는 2명이 각각 가속기 제어와 빔 라인 제어를 담당하는 것이 안정적인 빔 조사가 이루어진다.

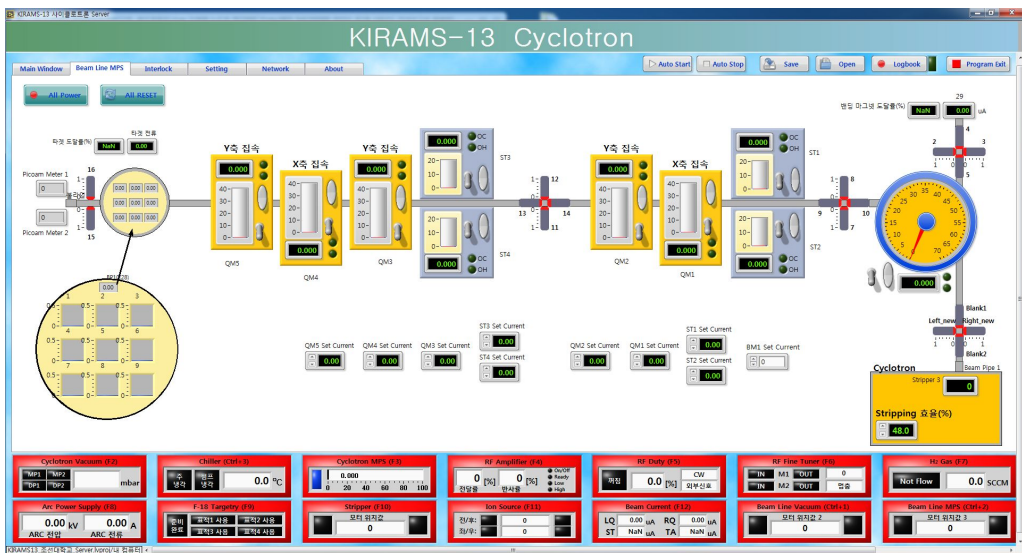


그림 50. 전자석 제어 프로그램

나. 진공 제어 프로그램

빔 라인 진공 시스템은 가속기 제어 프로그램에서 빔 라인 제어와 같은 탭 컨트롤이

아닌 팝업창으로 처리하였다. 비교적 제어 구조가 복잡하지 않고, 가속기 및 빔 라인 제어 시 팝업을 통해 현재 상태를 파악할 수 있는 기능이 필요하기 때문이다. 그림 51은 빔 라인 진공 제어를 위한 팝업창이다. 빔 라인 진공제어는 NI사의 Compact DAQ를 이용하여 제어되며, 32채널의 Digital Output 단자와 64채널의 Digital Input 단자를 포함하며, 빔 라인 계통의 진공도는 Agilent Technologies사의 XGS-600 컨트롤러를 장착하여 측정하도록 하였다.

빔 라인 진공 시스템의 구성은 2대의 Turbo Molecular Pump 시스템과 4개의 게이트 밸브를 갖추고 있다. 각각의 시스템은 가속기 운전 프로그램에서 제어할 수 있으며, 운전 프로그램 상단의 운전 모드설정 탭과는 무관하게 동작하므로, 가속기 운전 또는 빔 라인 제어 모드 창에서도 팝업시켜 제어가 가능하도록 하였다.

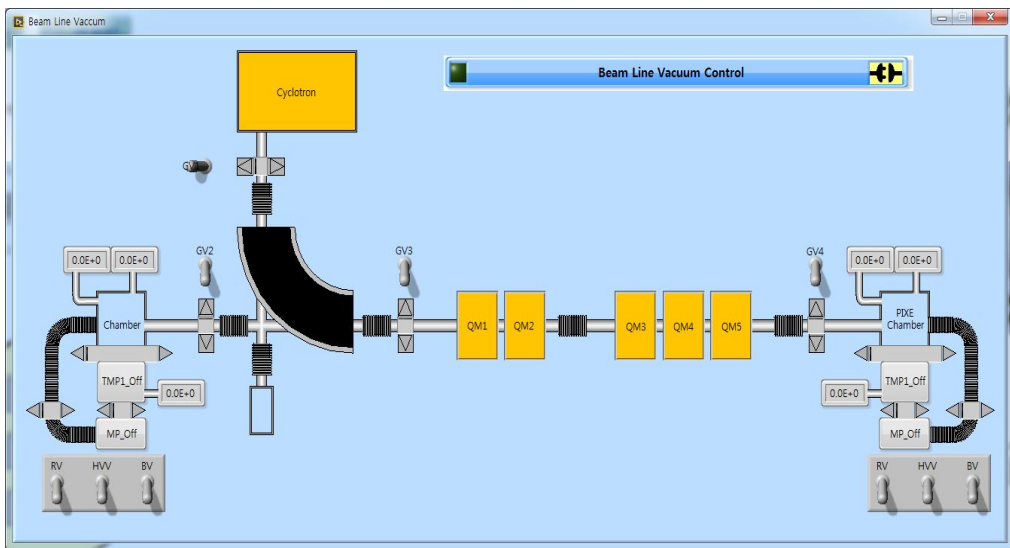


그림 51. 진공 제어 프로그램

다. 표적장치 제어 프로그램

PIXE-PIGE 분석 시 PIXE-PIGE 챔버 내부는 진공을 유지하는 상태에서 시료에 양성자 빔을 조사한다. 시료에 빔을 조사하기 위해서 필요한 것이 시료를 장착하고 교체하는 표적장치이다. 표적장치는 빔 조사 중 동작하여야 하는 장치로서 단일 시료뿐만 아니

라 여러 개의 시료가 동시에 장착될 수 있도록 설계되어야 한다.

빔 조사용 표적장치 제어 프로그램은 모터 컨트롤러와의 통신연결, 모터 위치 데이터 저장, 에러 체크 등을 수행하는 메인 구조를 중심으로, 사용자가 컴퓨터 화면을 통해서 표적장치를 제어할 수 있도록 하는 디스플레이 구조와 각각의 표적 번호에 대한 모터의 위치 값을 저장할 수 있는 데이터 저장구조로 이루어져 있다. 본 프로그램에서는 6개의 표적을 선택할 수 있으며, 사용자는 표적 순서에 상관없이 선택할 수 있도록 프로그램을 설계하였다.

그림 52는 빔 조사용 시료를 선택할 수 있는 표적장치 제어 프로그램이다. 1번부터 6번까지 6개의 시료를 장착하고 순서에 상관없이 선택할 수 있다. 이 프로그램에는 현재 시료에 조사되고 있는 빔 전류까지 표시할 수 있으며, 빔 조사 데이터도 시료별로 구분하여 저장된다.

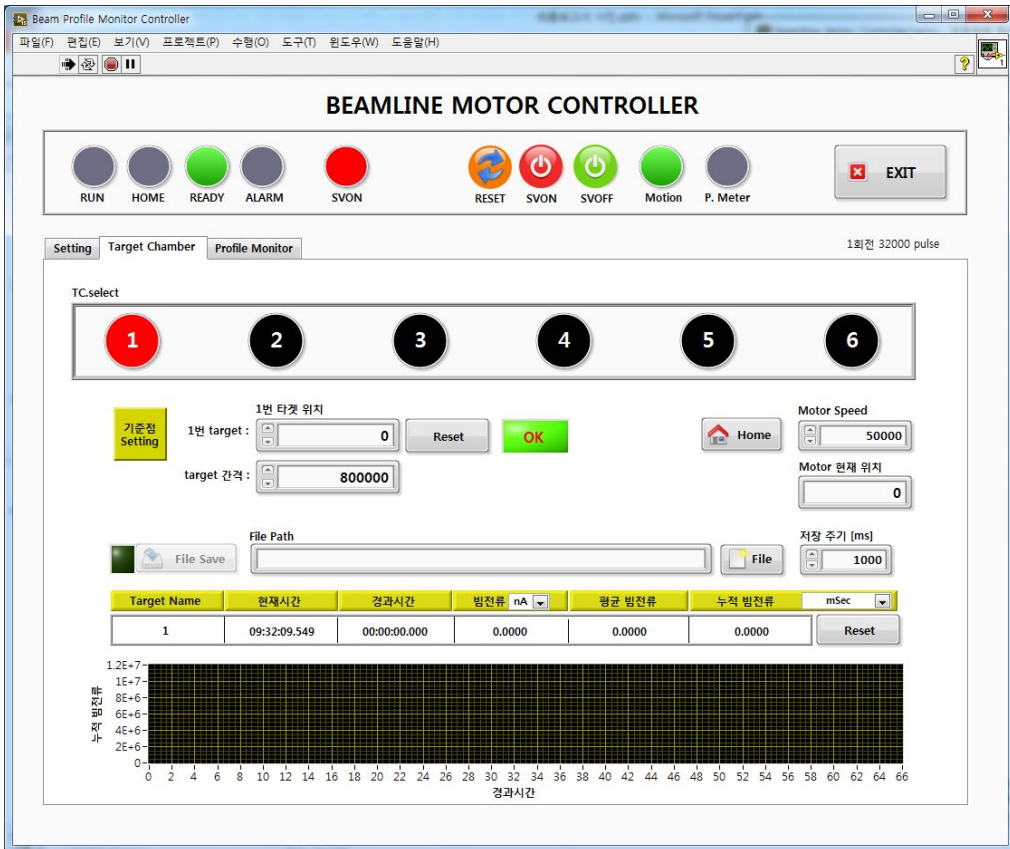


그림 52. 표적장치 제어 프로그램

3. 가속기 및 빔 라인 통합 제어 시스템

가속기 제어 프로그램과 빔 라인 제어 프로그램을 하나의 제어 시스템으로 통합하는 프로그램을 개발하였다. 기존의 가속기 제어 프로그램은 통신방식 및 제어장치 추가가 불가능한 점의 한계로 빔 라인을 동시에 운영하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 빔 라인과 별개로 제어되므로 PIXE-PIGE 분석 시 가속기의 데이터와 시료의 빔 조사 데이터 수집이 불가능하다. 따라서 가속기 및 빔 라인 제어를 연결할 수 있는 통합 제어 시스템을 추가하였다. 본 시스템의 통신 방식은 각각의 장비에 대한 제어 정보를 통합하여 관리하고, 이러한 정보를 컴퓨터와 주고받을 수 있도록 중간 Server 역할을 수행하는 장치를 추가하여, 컴퓨터 고장 또는 업그레이드를 위한 교체 시 사용자의 부담을 현저히 감소시켰다. 가속기 및 빔 라인 제어를 위해 통신 방식을 개선함으로써 컴퓨터와 제어장치와의 거리제한이 자유로워 졌다.

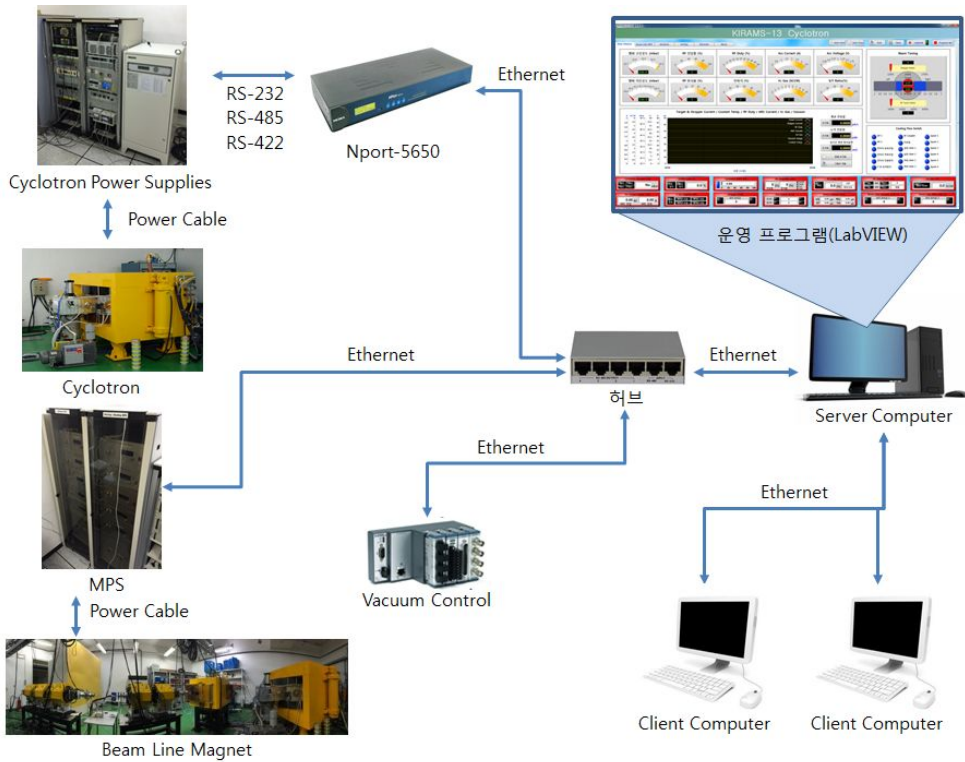


그림 53. 가속기 및 빔 라인 통합 제어 시스템

그림 53은 개발된 가속기 및 빔 라인 통합 시스템을 나타낸 것이다. 1대의 Server 컴퓨터가 가속기 및 빔 라인 제어장치를 통합관리하고, 2대의 Client 컴퓨터가 이러한 데이터를 공유하면서 동시에 양방향에서 가속기와 빔 인출 제어를 수행할 수 있도록 구축되어 있다. 이와 같은 통합 제어 시스템은 2~3명이 동시에 가속기를 운전하고, 빔 인출 제어 프로그램을 구동시킬 수 있으며, 빔 라인의 진공 시스템 까지 제어할 수 있다.

제 4 장 이온빔 분석 실험

본 장에서는 이온빔 분석에 관한 다양한 실험에 대하여 기술하였다. 제 1절에서는 본격적인 이온빔 분석을 위한 PIXE-PIGE 분석용 빔 인출에 관한 실험으로, PIXE-PIGE 분석용 빔 라인의 주요 구성품을 3단계로 구분하여 각각의 단계에서 이온빔 인출 실험을 수행한 결과를 설명하였다. 제 2절부터는 사이클로트론에서 인출된 이온빔을 이용하여 양성자 방사화 분석(PAA) 실험, PIXE 분석 실험, PI GE 분석 실험 등을 수행하였으며, 이에 대한 실험조건 및 결과에 대해 각 단원별로 기술하였다.

제 1 절 이온빔 인출 실험

사이클로트론으로부터 인출된 양성자 빔을 빔 라인으로 수송하는 실험은 2 가지 방법으로 수행하였다. 첫 번째 방법은 양성자 방사화 분석 실험을 위한 13 MeV 양성자 빔을 그대로 인출하는 실험을 수행하였으며, 두 번째 방법은 PIXE-PIGE 분석 실험을 위한 3.5 MeV 양성자 빔을 인출하는 실험을 수행하였다. 13 MeV 양성자 빔은 빔 라인 재료들과 반응하면 대부분 방사화를 시킬 수 있는 에너지 이므로 사이클로트론실 내부의 차폐벽까지만 인출하였으며, 3.5 MeV 양성자 빔은 빔 라인 재료에 대해 방사화가 일어나지 않는 에너지 이므로 PIXE-PIGE 분석실까지 인출하는 실험을 수행하였다.

1. 13 MeV 양성자 빔 인출 실험

사이클로트론에서 vault 내부 차폐벽까지 13 MeV 양성자 빔의 인출은 총 3단계로 구분하여 실험하였다. 1단계는 가속기로부터 인출된 빔을 90도 횡용 전자석에 입사시키고, 90도 횡용 전자석의 자장 전류를 증가시키면서 빔의 휨 정도를 관찰하였다. 2단계는 90도 횡용 전자석과 2중 4극 전자석을 통과한 빔의 양을 측정하였으며, 3단계는 순차적으로 90도 횡용 전자석, 2중 4극 전자석, 그리고 3중 4극 전자석을 통과한 후 최종 차폐벽 위치에서 빔의 양을 측정하였다.

그림 54는 PIXE-PIGE 분석용 빔 라인의 전체 layout 이며, 사이클로트론을 가동하는

동안 번호가 부여된 4 지점에서 각각의 빔 전류를 측정하였다.

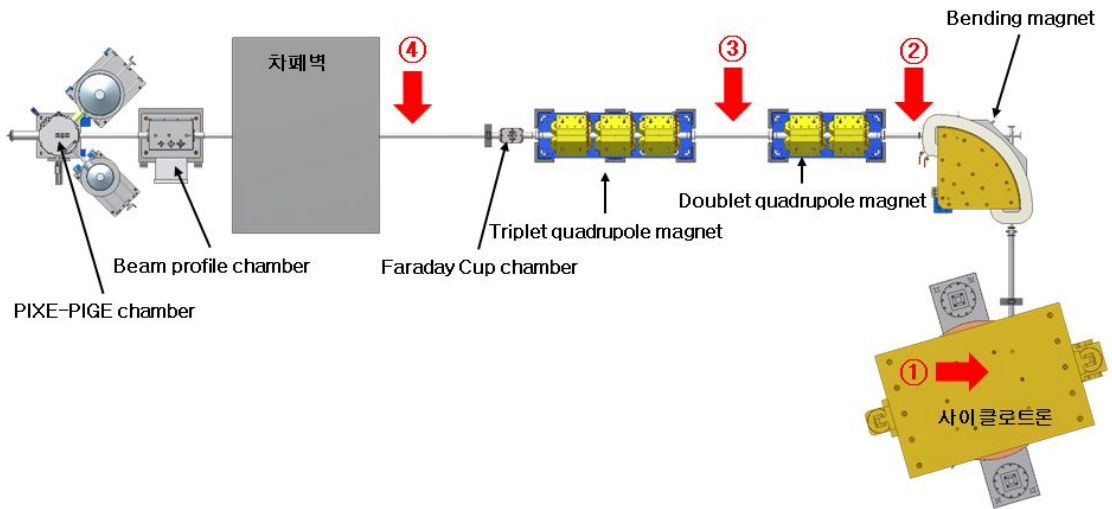


그림 54. 13 MeV 양성자 빔 인출 실험 배치도

이와 같이 실험 장치를 구성하고 빔 인출 실험을 수행한 결과를 종합적으로 정리하면 지점 ① 에서의 빔 전류 값은 2.42 uA 이며, 이는 사이클로트론의 stripper에서 측정된 값이다. 사이클로트론에서 인출된 2.42 uA 의 빔 전류는 90도 휨용 전자석을 지나면서 지점 ② 위치에서의 빔 전류 값으로 감소한다. 90도 휨용 전자석에 의해 감소된 빔 전류량은 약 41.5% 정도에 이르며, ② 지점에서의 빔 생존률은 58.5% 이다. 이와 같은 상태로 사이클로트론을 운전하고 90도 휨용 전자석의 자장전류 값을 일정하게 유지하면서 지점 ③ 에서의 빔 전류 값을 측정한 결과 1.26 uA를 얻었다. 지점 ③ 까지의 빔 생존률은 52.1% 이며, 지점 ④ 에서는 1.03 uA 로 42.5% 가 살아남았다. 13 MeV 양성자 빔을 사이클로트론으로부터 차폐벽까지 인출하는 실험을 통해 사이클로트론에서 인출한 빔의 41% 이상이 차폐벽까지 무사히 수송될 수 있음을 확인하였다.

각 구간별 자세한 빔 인출 실험내용은 다음과 같다.

그림 55는 지점 ② 에서의 빔 인출 실험데이터를 나타낸다. 본 실험에서는 가속기의 stripper 에서 양성자 빔 3 uA 를 인출하는 실험으로, 90도 휨용 전자석의 직선 방향에 설치되어 있는 타겟에서 1 uA 가 측정되는 것이 관찰할 수 있다. 90도 휨용 전자석

의 자장 전류를 증가시켜 일정해지는 순간 빔 라인 쪽에 설치되어 있는 빔 모니터에서 빔 전류가 측정되는 것을 이 그림을 통해서 확인할 수 있다. 이때의 빔 전류는 약 0.5 uA 정도를 보인다.

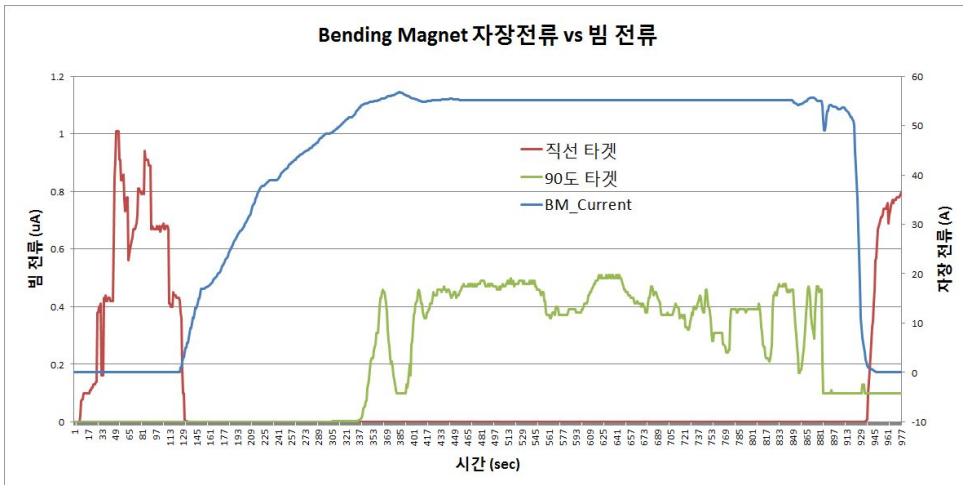


그림 55. 90도 휨용 전자석 자장전류와 빔 전류 측정결과

90도 휨용 전자석은 사이클로트론으로부터 1.8 m 정도의 간격을 두고 설치되어 있으므로 가속기에서 인출된 빔은 아무런 집속장치 없이 90도 휨용 전자석의 직선 방향에 설치된 타겟까지 빔이 도달하며, 이는 30% 정도이다. 90도 휨용 전자석의 직선 방향에 설치된 타겟에서 빔 전류 값을 확인 후 전자석의 자장 전류 값을 인가시켰다. 그림 55와 같이 90도 휨용 전자석의 90도 방향에 설치된 타겟에서 빔 전류가 측정되면 전자석의 자장 전류 값이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 가속기에서 인출된 빔의 에너지와 관계되며, 이때 일정하게 유지되는 자장 전류 값은 평균 55.2A로 측정되었다. 여기에서 전자석 설계 값과 같이 자장 효율을 99%로 한다면, 빔의 에너지도 얻을 수 있다. 이때의 양성자 빔의 에너지는 11.7 MeV를 나타낸다. 90도 휨용 전자석의 자장 전류 값이 57.17A 까지 상승시키면 13 MeV 양성자가 인출된다. 하지만 이 에너지에 해당하는 빔 전류가 낮아서, 90도 휨용 전자석에서 빔 라인으로 최대의 빔 전류를 보내기 위한 빔 에너지 선택은 11.7 MeV 이었다. 이 그림에서도 90도 휨용 전자석에 의해 감소된 빔은 약 45% 정도이며, 약 55% 정도가 살아남는 것으로 나타난다. 지점 ③ 에서의 빔 인출 실험한 컴포넌트의 배치는 다음과 같다. 90도 휨용 전자석

다음으로 직경 30 mm quadrant, 조절용 전자석, 2중 4극 전자석, 직경 20 mm quadrant, 그리고 빔 모니터 순서로 배치하였다. 2중 4극 전자석은 90도 휨용 전자석에 가까운 쪽부터 X축을 집속 시키고, Y축을 집속시키는 순서이다. 90도 휨용 전자석과 2중 4극 전자석 사이에는 지름 30 mm 의 직경을 가지는 quadrant 가 설치되었다. 90도 휨용 전자석을 통해 회전한 빔은 곧바로 지름 30 mm 의 quadrant 에 의해 2중 4극 전자석으로 이송되며, 이때 조절용 전자석을 이용하여 빔의 방향을 상하좌우로 약간씩 조절하였다. 이와 같은 과정을 통해 가속기로부터 1.4 uA 양성자 빔을 인출하여 90도 휨용 전자석을 통과시키고, 2중 4극 전자석을 통과한 후 빔 전류는 0.36 uA 가 빔 모니터에 입사되었다. 빔의 생존율은 약 26% 정도로 확인되었다. 그러나 빔 라인에서의 빔 전류 인출은 여러 번의 반복 실험을 통해 전자석 제어기술과 빔의 상태 등에 대한 경험이 축적될수록 향상되었으며, 최종적으로 2.42 uA 의 빔을 사이클로트론에서 인출하여 90도 휨용 전자석과 2중 4극 전자석을 통과한 빔 전류 값은 1.26 uA로 사이클로트론 인출 빔 대비 52.1% 까지 향상되었다.

지점 ④ 에서의 빔 인출 실험은 사이클로트론부터 빔 통과 직경 20 mm 의 quadrant, 90도 휨용 전자석, 빔 통과 직경 30 mm 의 quadrant, 조절용 전자석, 2중 4극 전자석, 빔 통과 직경 20 mm quadrant, 조절용 전자석, 3중 4극 전자석, 빔 통과 직경 20mm quadrant, 타겟의 순서로 배치되어 있다. 3중 4극 전자석은 2중 4극 전자석에 가까운 쪽부터 Y축 집속, X축 집속, Y축 집속 순으로 배치되었다. 2중 4극 전자석을 통과한 빔은 조절용 전자석을 이용하여 빔의 방향을 조절하였다. 3중 4극 전자석의 경우에는 첫 번째 전자석의 집속방향인 Y축에 대해서만 빔이 집속되는 현상이 보였다. 두 번째 전자석의 X축 방향과 세 번째 전자석의 Y축 방향에 대한 전류 값 변화에 대해 빔의 퍼짐이나 집속 현상이 관찰되지 않았다.

각 지점에서 이와 같은 과정을 통해서 빔을 이송한 결과, 최종단에서의 빔 수송은 사이클로트론 대비 42.5% 정도로 나타났다. 이에 대한 실험 지점별 인출 빔 전류와 빔 생존율을 표 13에 정리하였다.

표 13. 13 MeV 양성자 빔 인출 실험결과

구분	①	②	③	④
빔 전류	2.42 uA	1.41 uA	1.26 uA	1.03 uA
생존률(%)	100	58.5	52.1	42.5

13 MeV 양성자 빔 인출 실험결과, 빔의 대부분은 90도 횡용 전자석을 통과하면서 소실되었다. 이는 사이클로트론에서 인출되는 빔의 에너지가 모두 13 MeV 로 동일하지 않다는 의미이다. 사이클로트론 내부에서는 H^- 이온을 가속시켜 stripper를 통과할 때 2개의 전자를 벗겨내므로 H^+ (양성자)를 인출하는데, 이 때 stripper 에 의해 가속된 H^- 이온은 다양한 에너지 분포를 갖는다. 따라서 사이클로트론에서 인출되는 빔에는 정확한 13 MeV 에너지의 빔뿐만 아니라 그 이하의 에너지를 갖는 빔도 인출되며, 이와 같이 인출된 빔은 90도 횡용 전자석에 입사되고, 사용자가 입력하는 90도 횡용 전자석의 자장 전류 값에 의해 선택적으로 에너지가 선별된다.

2. 3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험

사이클로트론에서 인출된 빔은 13 MeV 양성자 빔이므로 PIXE-PIGE 용 3.5 MeV 양성자 빔으로의 에너지 감속이 필요하다. 본 연구에서는 감속재로 흑연을 사용하였으며, 0.25 mm 흑연 박막을 사용하였다. 총 5 가지 종류의 두께로 실험하였으며, 0.25 mm부터 0.75 mm 까지의 두께는 0.25 mm 박막을 한 겹씩 추가하면서 조절하였으며, 0.8 mm 와 0.9 mm 두께는 흑연 덩어리를 직접 가공하여 사용하였다. 감속재인 흑연의 두께에 따라 13 MeV 양성자가 감속된 에너지를 표 14에 정리하였다. 3.5 MeV 에너지로 감속시키기 위해 필요한 흑연의 두께는 0.9 mm 이며, 이 때 90도 횡용 전자석 에 인가된 자장전류 값은 30 A 이었다. 이에 대하여 인출된 빔 에너지는 PIXE 용으로 사용되는 3.5 MeV 이다.

표 14. 에너지 감속재(흑연) 두께에 따른 인출 빔 에너지

감속재 두께(mm)	0.25	0.5	0.75	0.8	0.9
2극 전자석 자장 전류(A)	52.2	50.4	47.8	34.5	30.0
빔 에너지(MeV)	10.5	9.8	8.8	4.6	3.5

PIXE-PIGE 챔버 까지 빔 인출실험은 그림 56과 같이 지점 ①, 지점 ②, 지점 ③에서 각각 빔 전류 측정을 통해 이루어졌다. 빔 전류 측정은 PIXE-PIGE 챔버에 설치되어 있는 Faraday Cup 에 의해서 측정된다. PIXE-PIGE 챔버 의 Faraday Cup 은 직경 20 mm 에 길이가 150 mm 로 되어 있으며, 2차 전자 억제장치가 부착되어 있어 시료에서 양성자에 의해 튀어나오는 2차 전자들이 Faraday Cup 내부로 들어가 빔 전류 값에 영향을 주는 것을 방지한다.

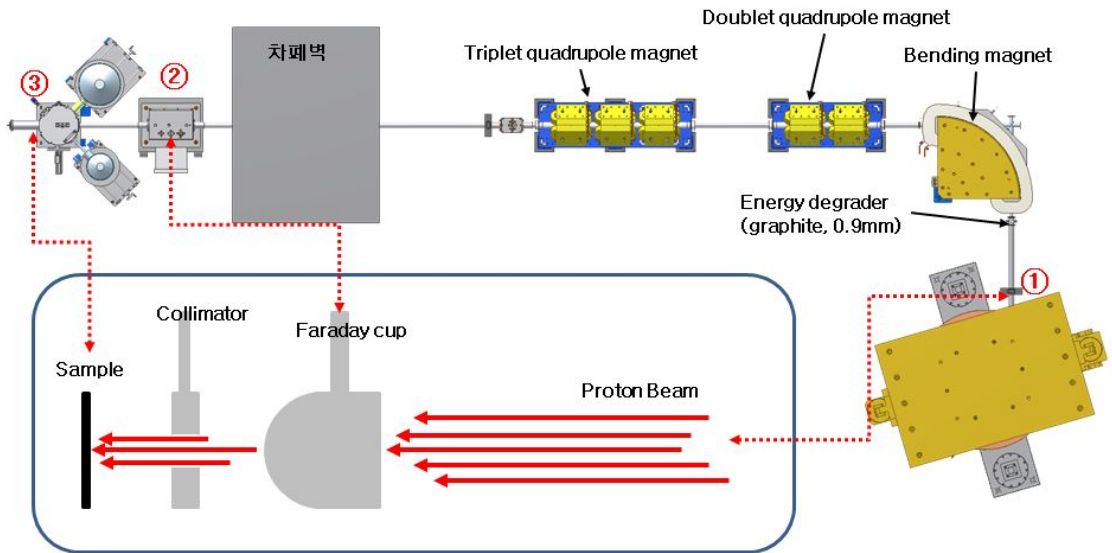


그림 56. 3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험 배치도

빔 라인 구간별 빔 인출 실험을 위해 각 구간별로 빔 모니터를 설치하여 빔 전류 값을 측정하였다. 빔 전류 값의 측정 단위는 나노암페어(nA) 이며 빔 전류 측정에 사용된 전류 적분계는 Keithley 사의 picoammeter를 사용하였다.

빔 에너지에 따른 각 구간별 빔 전류 인출 효율을 살펴보면 다음과 같다. PIXE-PIGE 챔버의 앞단 노즐이 설치된 지점 ②까지는 사이클로트론에서 인출된 빔의 전류량 대비 약 0.103% 가 이송되었으며, 최종 단의 표적이 설치된 지점 ③에서는 사이클로트론 대비 0.022% 의 빔이 인출됨을 확인하였다. 각 구간별 빔 전류 측정값을 표 15에 정리하였다.

표 15. 3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험결과

구분	①	②	③
빔 전류	5.62 uA	5.81 nA	1.21 nA
생존률(%)	100	0.103	0.022

3.5 MeV 양성자 빔 인출 실험결과, 빔의 소실은 대부분 빔 에너지 감속장치를 통과한 빔이 90도 휘용 전자석을 통과하는 도중에 발생하므로 빔 에너지 감속장치의 두께 선정 시 정밀한 제작이 필요할 것이며, 빔 에너지 감속장치의 두께에 따른 빔 라인의 전자석에 대한 배열 등을 수정하면 PIXE-PIGE 분석에 필요한 양은 충분히 인출할 수 있을 것으로 판단된다. 표 16에서는 빔 라인 구간별 13 MeV 빔과 3.5 MeV 빔 인출 실험 결과를 모두 정리하였다.

표 16. 빔 라인 구간별 13 MeV 및 3.5 MeV 빔 인출 전류

구 간	13 MeV 빔 전류	3.5 MeV 빔 전류
사이클로트론 인출 포트	2.42 uA (100%)	5.62 uA (100%)
90도 휘용 전자석 후단	1.41 uA (58.5%)	
2중 4극 전자석 후단	1.26 uA (52.1%)	
3중 4극 전자석 후단	1.03 uA (42.5%)	
PIXE-PIGE 챔버		5.81 nA (0.103%)
PIXE-PIGE 표적		1.21 nA (0.022%)

제 2 절 양성자 방사화 분석(PAA) 실험

Rb-Sr 연대측정법은 고생대, 선캄브리아 시대의 암석에 대한 연대측정에 사용된다. 측정하는 방법으로는 열 이온화 질량분석기(TIMs)를 이용하며, ^{87}Rb 의 농도와 ^{87}Sr 의 농도를 측정한다. 아울러 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비의 초기치를 구하여 연대측정의 신뢰도를 높인

다. 본 실험에서는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 13 MeV 양성자 가속기를 이용하여 측정하였다.

10 MeV 대역의 운동에너지를 갖는 양성자는 대부분 물질에서 (p,n) 반응에 대한 흡수 cross-section이 높다. 이러한 에너지를 갖는 양성자를 흡수한 원소는 원자번호가 1 증가한 핵종으로 핵변환되며, 이들은 대부분 짧은 반감기를 가지고 방사능 붕괴를 통해 다시 원래의 핵종으로 되돌아간다. 따라서 strontium 시료에 양성자를 조사하면 시료 내에 함유되어 있는 strontium 동위원소는 yttrium 동위원소로 핵변환 되며, 이때의 yttrium 동위원소는 방사화된 방사성동위원소이다. 따라서 각각의 yttrium 동위원소에서 방출하는 감마선을 분석하여 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 계산하였다.

표 17. KBSI로부터 지원 받은 1차 시료

Sample name	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ Standard Error
VDT2	650.9	0.701575	0.000012
120316-1	243.2	0.706097	0.000004
NMK7	42.8	0.704689	0.000006
KKKRD1	39.3	0.701660	0.000005
VDT3	29.2	0.711369	0.000031

※ SRM-987 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710254\pm 0.000006(N=10, 2\sigma \text{ Standard Error})$

표 18. KBSI로부터 지원 받은 2차 시료

Sample name	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ Standard Error
J15-235	4794.3	0.706073	0.000009
J15-236	5362.9	0.705157	0.000008
J15-237	16430.5	0.702951	0.000005

※ SRM-987 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710246\pm 0.000003(N=10, 2\sigma \text{ Standard Error})$

스트론튬의 동위원소 구성비를 알 수 있는 시료는 Korea Basic Science Institute(KBIS)으로부터 총 2차례에 걸쳐 암석시료를 지원받았다. 1차 시료로는 VDT2로 명명되어진 시료를 포함하여 5종의 시료를 지원받았으며, 이들 시료 중 strontium의 양이 650.9 ppm으로 가장 많이 함유되어 있는 시료로 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비는

0.701575 이다. 이들 분석데이터는 열 이온화 질량분석기(TIMS)를 이용하여 분석된 것이다. 표 17은 KBIS로부터 1차로 지원받은 시료에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비 데이터이며, 표 18은 2차로 지원받은 시료이다. 2차로 지원받은 시료는 1차 실험에서 스트론튬의 함유량이 낮아 감마선 피크 확인이 어려운 이유로 시료 중 스트론튬 함유량이 높은 시료를 선별하여 선정하였다.

1. 시료조제(펠릿시료) 및 균질시료 준비

분체시료의 경우 PIXE-PIGE 계측을 위한 시료준비로서 분체시료를 그대로 시료지지막에 입혀서 계측하거나 혹은 펠릿화하여 계측하는 방법이 있다. 시료지지막에 입혀서 바로 계측을 하는 경우에는 시료준비가 신속한 장점이 있는 반면 시료표면이 거칠어 시료 매질효과 보정이 효과적으로 이루어지질 못하며, 지지막의 불순물에 관한 보정도 효과적으로 이루어지질 못한다는 점 등이 단점으로 지적되어 보통 분체시료는 펠릿화하여 계측된다. 일반적으로 지질시료의 경우에는 가압을 하여도 자체지지가 쉽지 않으므로 응집제로 셀룰로즈 혹은 흑연 등을 사용한다.

시료의 펠릿화를 위하여 펠릿 시스템은 조선대학교 공동장비운영센터에서 보유하고 있는 SPECAC 사의 GS15011 제품으로, 주요 제원은 표 19와 같으며, 외관은 그림 57에서 볼 수 있듯이 매뉴얼 타입의 가압기 형태이다.

표 19. 펠릿 시스템 사양

구 분	내 용
maximum pressure :	15 ton
pressing type :	oil pressing
consuming time for pelleting :	1 min
ability for pressing time change :	possible by setting timer(sec to hr)
pellet holder size :	Φ13mm

액체시료의 경우 균질시료의 준비에 있어서 이론상 및 실제상 문제가 없으나, 펠릿시료나 분체시료 자체를 PIXE 분석법에 의하여 정량할 시에는 PIXE 분석법의 표면분석적

특성으로 인하여 비균질시료의 경우 시료정량에 있어서 시료의 비균질도가 주요한 오차원인으로 작용한다. 일례로 3 MeV 정도의 양성자 빔을 사용하여 지질시료의 분석을 행하는 경우 약 30 μm 정도의 깊이까지 분석이 되는 것으로 보고되고 있으나[9], 보통 특성 X-선 스펙트럼 형성에 크게 기여하는 깊이는 시료표면에서 10 μm 이내이다.



그림 57. 펠렛 시스템

그러므로 시료가 균질 혼합되어 있지 않거나, 시료입자의 크기를 적정크기 이하로 제한하지 않을 경우 조사 빔 면적내 시료 알갱이들의 표면만을 분석하게 되는 결과로 심한 측정오차를 산출하게 된다.

펠렛 시스템으로 암석시료를 펠렛화하는 과정은 그림 58과 같다. PIXE-PIGE 분석을 위해 사용된 암석시료를 혼합용기에 넣고 시료무게에 대한 25% 정도의 셀룰로즈와 함께 고르게 섞어 직경 13 mm, 두께 1 mm 정도의 펠렛으로 제조되어 계측에 사용된다. 제조된 시료는 그림 59와 같으며, 각 시료의 무게와 셀룰로즈의 무게비는 표 20과 같다.



그림 58. 시료의 펠릿화 과정

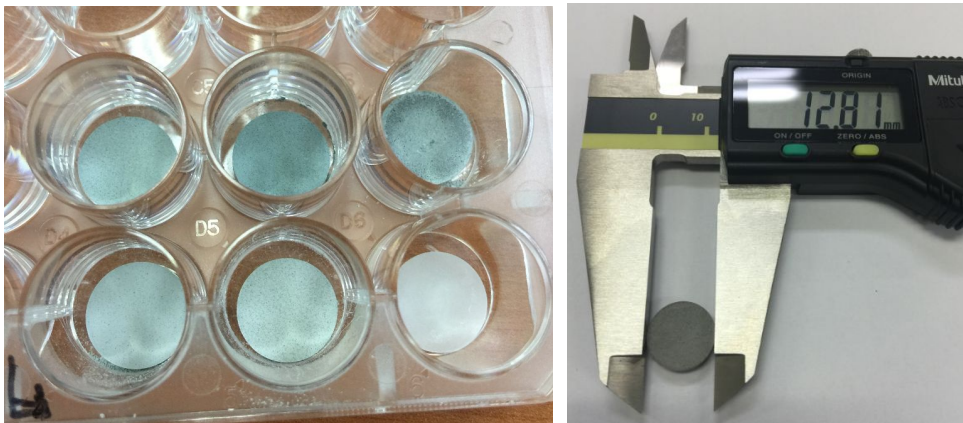


그림 59. 펠릿으로 제조된 암석시료

표 20. 암석시료별 셀룰로즈 혼합비율

시료명		시료무게(g)	셀룰로즈 무게(g)	셀룰로즈 혼합비율(%)
NBR-987	1	0.4068	0.1017	25.00
	2	0.4068	0.1017	25.00
J15-235	1	0.532	0.1333	25.06
	2	0.4055	0.1013	24.98
J15-236	1	0.405	0.1012	24.99
	2	0.405	0.1012	24.99
J15-237	1	0.405	0.1012	24.99
	2	0.405	0.1012	24.99

양성자 빔 조사를 위한 시료는 분말의 형태이며, 여기에 KBr(potassium bromide) 소량을 섞어 10 ton의 압력을 이용하여 지름 12.8 mm, 두께 3 mm의 펠릿 형태로 시료를 제작하였다. 검교정용 시료로는 상업용으로 판매되는 제품인 NIST NBS-987을 사용하였으며, 암석 시료와 동일한 방법으로 제작하였다.

스트론튬의 함량에 따른 동위원소 비 측정감도를 높이기 위하여 시료 내에 함유된 스트론튬 함량이 1차 시료에 비해 상대적으로 높은 시료를 선별하여 2차 실험을 수행하였다. 그림 60은 상업용으로 판매되는 스트론튬 동위원소 비를 알고 있는 표준시료이며, 이 표준 시료와 기초과학지원연구원으로부터 수령한 2차 시료에 셀룰로즈를 내부 지지재로 첨가하여 제작한 펠릿 시료를 그림 61에 제시하였다. 좌측부터 SRM-987, J15-235, J15-236, J15-237 순으로 시료가 배열되어 있다. 각 시료는 2개씩 제작하였다.

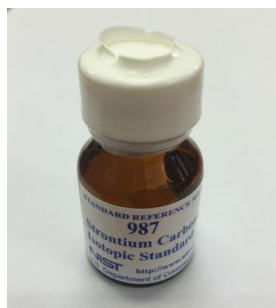


그림 60. SRM-987 암석 표준시료



그림 61. 스트론튬 함량이 높은 2차 시료

2. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 구성비

시료에 입사된 양성자는 시료와 (p,n) reaction을 일으키고, 이에 따라 시료 내에 함유된 strontium 동위원소는 각각의 yttrium 동위원소로 핵변환 된다. 이렇게 생성된 방사성동위원소인 yttrium은 비교적 짧은 반감기를 가지고 있으며, 감마선 방출을 통해 다시 안정한 strontium으로 전환한다. 이때 방출되는 yttrium의 감마선 계수 값 (counts)은 스트론튬의 농도와 비례한다. 따라서 ^{86}Sr 과 ^{87}Sr 의 (p,n) 반응 결과물인 $^{86}\text{Y}(t_{1/2} : 14.74\text{h})$ 과 $^{87}\text{Y}(t_{1/2} : 79.8\text{h})$ 방사능비를 이용하여 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}_{\text{Sample}}(\%) }{{}^{86}\text{Sr}_{\text{Sample}}(\%) } = \frac{{}^{87}\text{Sr}_{\text{STD}}(\%) }{{}^{86}\text{Sr}_{\text{STD}}(\%) } \times \frac{{}^{86}\text{Y}_{\text{STD}}(\text{counts}) }{{}^{87}\text{Y}_{\text{STD}}(\text{counts}) } \times \frac{{}^{87}\text{Y}_{\text{Sample}}(\text{counts}) }{{}^{86}\text{Y}_{\text{Sample}}(\text{counts}) }$$

여기서,

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}_{\text{Sample}} }{{}^{86}\text{Sr}_{\text{Sample}}} : \text{Strontium ratio of VDT2 sample}$$

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}_{\text{STD}} }{{}^{86}\text{Sr}_{\text{STD}}} : \text{Strontium ratio of SRM-987}$$

$$\frac{{}^{86}\text{Y}_{\text{STD}} }{{}^{87}\text{Y}_{\text{STD}}} : \text{Yttrium ratio of activated SRM-987}$$

$$\frac{{}^{87}\text{Y}_{\text{Sample}}}{{}^{86}\text{Y}_{\text{Sample}}} : \text{Yttrium ratio of activated VDT2 sample}$$

3. 양성자 빔 조사

13 MeV 양성자 빔 조사를 위해 제작된 암석 시료는 그림 62와 같이 빔 조사용 타겟 장치에 장전되어 사이클로트론에 설치되었다. 각각의 시료에 해당하는 양성자의 조사 시간 및 빔 조사량은 표 21과 같다.

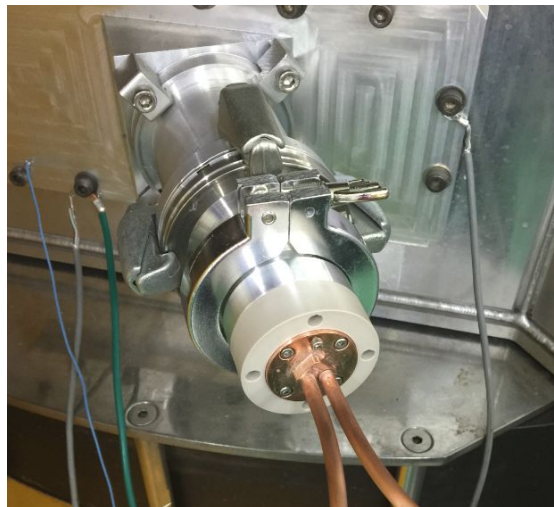


그림 62. 빔 조사를 위하여 표적장치에 장착된 시료

표 21. 양성자 방사화 분석용 빔 조사 데이터

Category	NBS-987	VDT2 sample
Average beam current (uA)	0.97	0.76
Accumulated beam current (uA·hr)	0.39	0.27
Operation time (mm:ss)	01:44	02:57
Measurement distance between detector and sample (m)	0.5	0.5

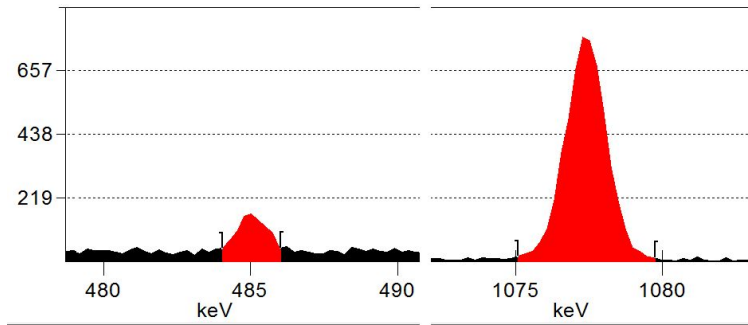


그림 64. SRM-987 시료의 이트륨 감마선 피크(좌: ^{87}Y , 우: ^{86}Y)

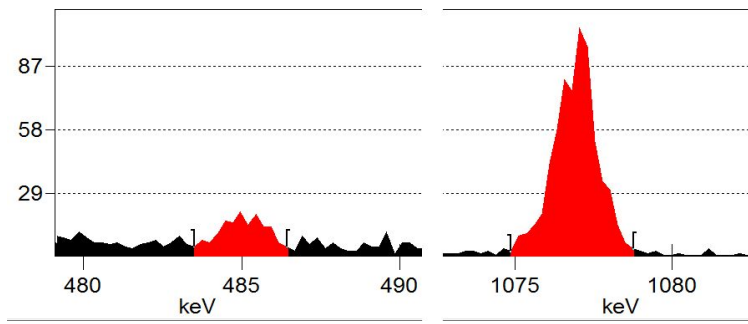


그림 65. VDT2 시료의 이트륨 감마선 피크(좌: ^{87}Y , 우: ^{86}Y)

따라서 이들 yttrium peak의 계수 값을 이용하여 원 시료에 함유되어 있는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비를 계산하였다.

5. 실험결과

각각의 ^{86}Y 과 ^{87}Y peak 높이는 시료에 함유되어 있는 ^{86}Sr 과 ^{87}Sr 의 양과 비례하므로 이들 yttrium peak의 계수 비는 ^{86}Sr 과 ^{87}Sr 의 비와 동일하다. 따라서 동위원소비 계산식을 이용하여 ^{86}Sr 과 ^{87}Sr 의 동위원소 비를 계산하였으며, 표 22에 정리하였다.

표 22. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비 계산결과

Elapsed time after irradiation (min)	VDT2 sample (Net Counts)		$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Relative Error (compare with TIMS)
	^{87}Y (484.8 keV)	^{86}Y (1076.6 keV)		
43	73	657	0.757513	8.0%
48	70	639	0.680949	-2.9%
53	82	633	0.773303	10.2%
58	65	633	0.688879	-1.8%
64	60	578	0.662454	-5.6%
70	67	624	0.647385	-7.7%
100	86	621	0.820929	17.0%
210	97	574	0.794891	13.3%
Average			0.728288	3.8%

빔 조사 후 시료에서 방출되는 감마선 분석은 경과시간에 따라 수행하였다. SRM-987과 VDT2 sample 시료에 대해 최초의 측정치는 빔 조사 후 43분부터 시작하여 210분까지 측정하였다. 경과시간 별 VDT2 sample에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소 비는 평균 0.728288로 계산되었다. 이 값에 대한 TIMS 분석결과와의 상대오차는 3.8%이며, 예측 표준편차는 3.8%로 나타났다.

일반적으로 시료에 함유된 strontium의 동위원소 구성비는 TIMS(Thermal Ionization Mass Spectrometer) 장비를 주로 이용하여 측정한다. 본 실험에서는 양성자 가속기를 이용한 PIGE(Proton Induced Gamma-ray Emission) 분석법 및 PAA(Proton Activation Analysis) 분석법의 일환으로 13 MeV 양성자를 VDT2 sample에 조사하여 방사화된 시료에 대해 감마선을 분석하고, 이를 통해 시료에 함유된 strontium 동위원소 구성비를 측정하는 실험을 수행하였다. 실험결과를 TIMS 분석결과와 비교한 결과, $96.2 \pm 3.8\%$ 의 정확도를 확인할 수 있었다.

암석의 종류에 따라 strontium 함유량이 수십 ppm에서 수천 ppm까지 다양하게 분포하고 있으나, 실험에 사용된 VDT2 sample 중에는 650.9 ppm의 strontium이 함유되어 있었다. 이 시료 이외에도 수십 ppm 수준의 농도를 가진 시료에 양성자를 조사하여 방사화 분석을 수행하였으나 모두 yttrium peak가 발견되지 않았다. 따라서 시료 중 strontium 함유량에 대한 방사화 분석의 검출하한치 산출연구도 의미 있을 것으로 판단된다.

제 3 절 양성자-유도 X-선 방출 분석(PIXE) 실험

PIXE 분석 실험 절차는 시료준비 단계와 3.5 MeV 양성자 빔 조사, 그리고 PIXE 스펙트럼 분석 단계로 총 3단계로 구성된다. 각각의 단계별 실험 내용에 대하여 각 단원에서 자세히 기술하였다.

1. 시료준비

PIXE 분석을 위한 시료는 다양하게 준비하였다. 양성자 빔 조사 시 발생하는 에너지에 따라 검출기의 에너지 교정용으로 단일원소만을 함유하고 있는 순도가 높은 박막 시료와 일상생활에서 원소의 함유성분 및 성분비를 알 수 있는 우리나라 주화까지 PIXE 분석에 시료로 활용하였다.

가. 단일원소 함유 박막시료

단일원소 함유 박막시료는 X-선 검출기의 에너지 교정을 위하여 사용된다. 이들이 순도는 99% 이상이며, 단일 원소로 이루어져 있다. 박막 시료로는 그림 66과 같이 Mo, Ti, Nb, C 등을 사용하였다. 시료는 Goodfellow사의 상업용 시료를 사용하였으며, 이들의 성분 및 함유량은 표 23에 정리하였다.

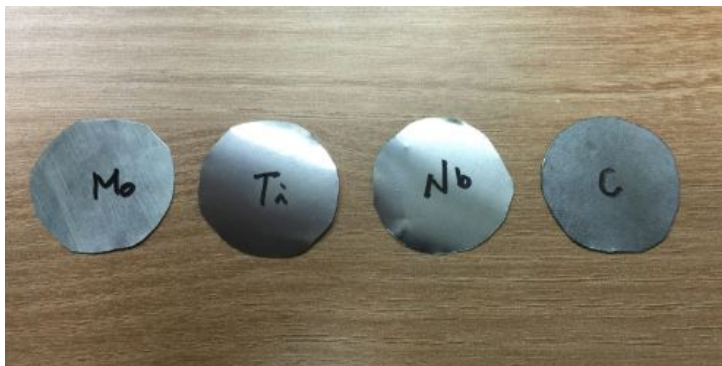


그림 66. PIXE 분석용 단일원소 박막 시료

표 23. PIXE 분석용 단일원소 함유 박막시료의 성분 함유량

박막 종류	두께 (mm)	순도 (%)
Carbon	0.25	99.8
Molybdenum	0.075	99.9
Niobium	0.05	99.9
Titanium	0.05	99.6

그림 67은 각각의 박막 시료를 시료 지지대에 장착한 모습이며, 이를 양성자 빔을 조사하기 위하여 PIXE 분석용 챔버 내에 설치되어 있는 빔 조사용 표적장치에 설치하였다.



그림 67. 지지대에 장착된 박막 시료

나. 대한민국 주화 시료

우리나라 주화는 1원화부터 500원화까지 다양하게 분포하고 있다. 본 연구에서는 2006년 이전에 발행된 구 10원화, 2006년 12월 이후 발생한 신 10원화, 50원화, 100원화, 500원화를 PIXE 분석용 시료로 사용하였다. 그림 68은 본 실험에 사용된 주화들의 사진이며, 표 24는 실험에 사용된 주화들의 성분 및 함유량 정보이다. 함유량의 정보는 한국조폐공사 홈페이지의 자료를 참고하였다.



그림 68. PIXE 분석용 주화 시료

표 24. PIXE 분석용 주화의 성분 함유량

주화	소재	성분
500원화	백동	Cu 75%, Ni 25%
100원화	백동	Cu 75%, Ni 25%
50원화	양백	Cu 70%, Zn 18%, Ni 12%
10원화(구)	황동	Cu 65%, Zn 35%
10원화(신)	구리 씩음 알루미늄	Cu 48%, Al 52%

그림 69는 주화 시료를 시료 지지대에 장착한 사진이다. 단일원소 박막 시료와 같이 지지대에 장착된 시료는 빔 조사를 위하여 빔 조사용 표적장치에 장착되었다.



그림 69. 빔 조사용 표적장치 지지대에 장착된 주화 시료

주화시료 장착 시 시료 지지대 양쪽에 티타늄과 몰리브덴 박막 시료를 장착하여 조사

하였는데, 이러한 이유로는 각각의 주화 시료에 양성자 빔을 조사 시 이들 시료에서 방출되는 X-선의 에너지를 비교·분석하기 위함이다.

다. 암석시료

본 실험에 사용된 암석시료는 한국기초과학지원연구원에서 지원한 시료로서, 양성자 방사화 분석을 수행하기 위하여 사용한 시료를 사용하였다. 실험에 사용된 암석시료는 양성자 방사화 분석 실험에서 사용하는 펠렛의 형태로 가공되어 있으며, 그림 70과 같이 시료 지지대에 장착하여 빔을 조사하였다.



그림 70. 빔 조사용 표적장치 지지대에 장착된 암석시료

2. 양성자 빔 조사

시료에 조사시킨 양성자의 에너지는 3.5 MeV 로 일정하였다. 이 에너지를 만들기 위하여 에너지 감속재로는 흑연 박막을 이용하였고, 이때의 흑연 박막 두께는 0.9mm 정도이다. PIXE 분석 챔버에서의 최대 빔 전류를 인출하는데 입력된 90도 횡용 전자석의 입력 전류값은 30 A 이었다.

PIXE 분석 시 각각의 시료에는 평균 0.27 nA 정도의 빔이 조사되었다. 조사된 총누적 전하량은 162 nC 정도였으며, 이는 X-선 스펙트럼 분석에 수반되는 통계적인 오차가 무시될 만큼의 X-선 계측수를 얻을 수 있는 충분한 양이었다.

그림 71부터 그림 72는 각 시료별 조사된 빔 전류량을 그래프로 나타낸 그림이다. 이들 그림에는 사이클로트론에서 인출된 빔 전류까지 동시에 표시하였다. 각각의 그림에서 나타나 있듯이 시료에는 20 % 이내의 안정된 빔이 조사되었다.

Ti 시료 빔 조사량

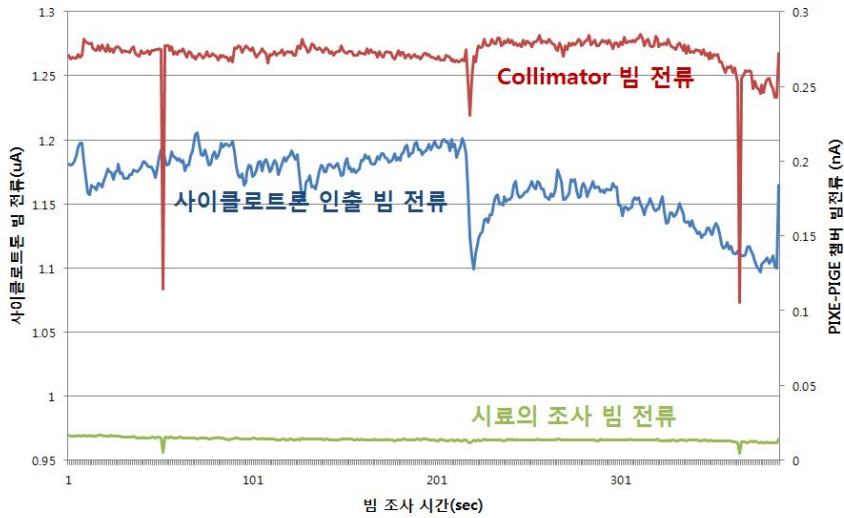


그림 71. Ti 시료의 조사 빔 전류

Al 시료 빔 조사량

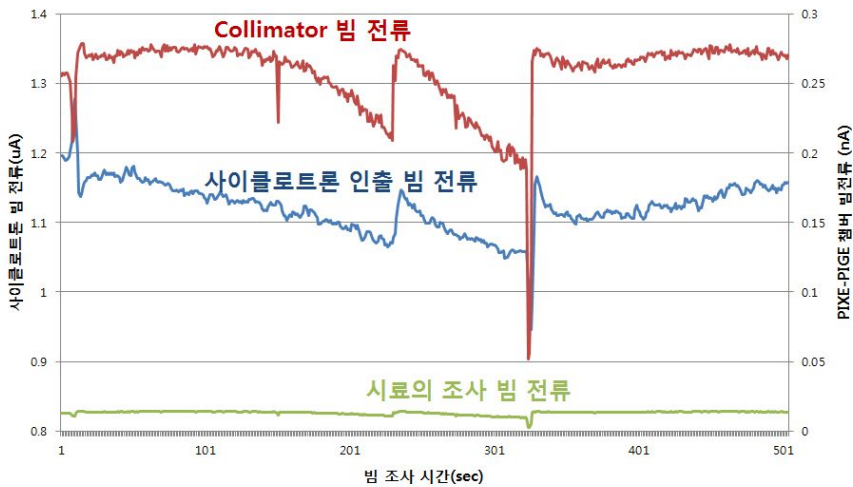


그림 72. Al 시료의 조사 빔 전류

Mo 시료 빔 조사량

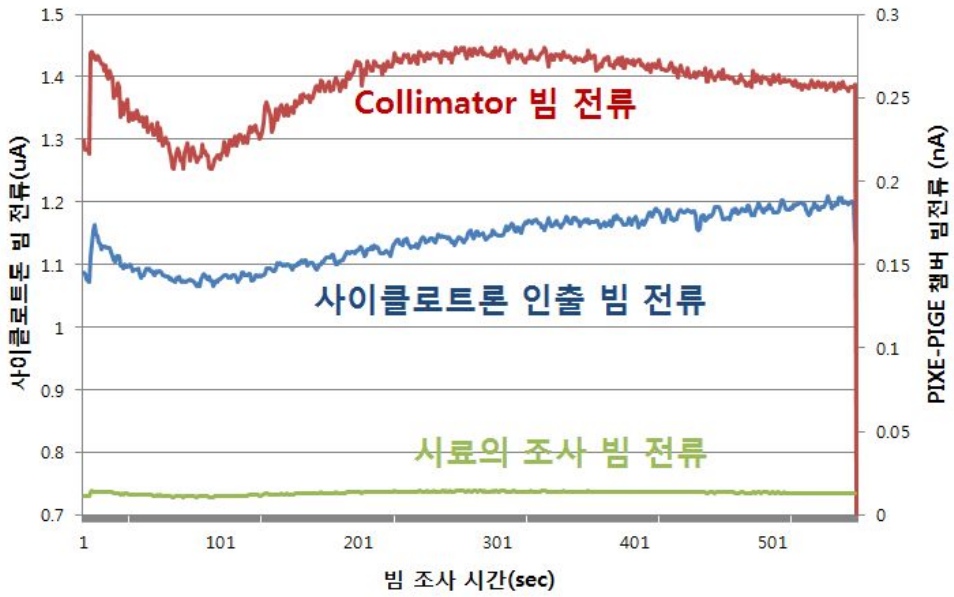


그림 73. Mo 시료의 조사 빔 전류

SUS 시료 빔 조사량

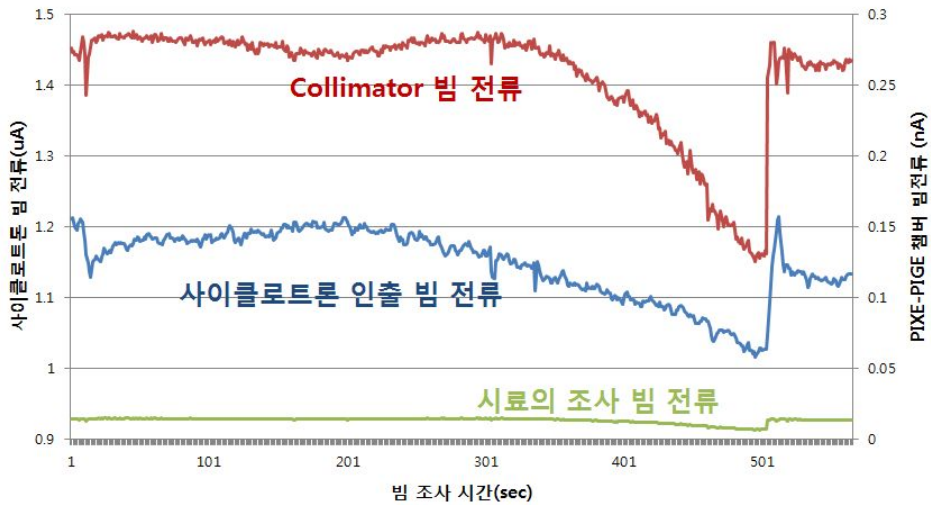


그림 74. SUS 시료의 조사 빔 전류

땀납 시료 빔 조사량

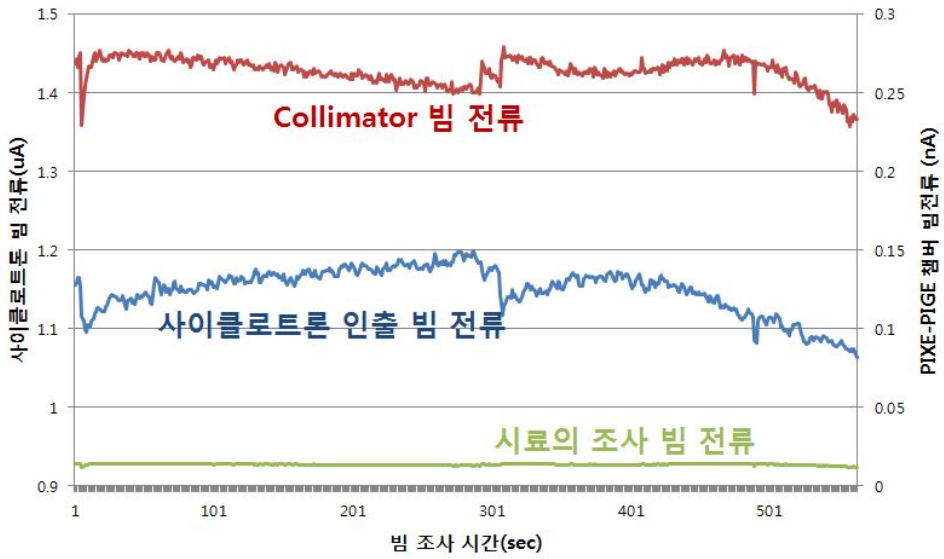


그림 75. 땀납 시료의 조사 빔 전류

실리콘 시료 빔 조사량

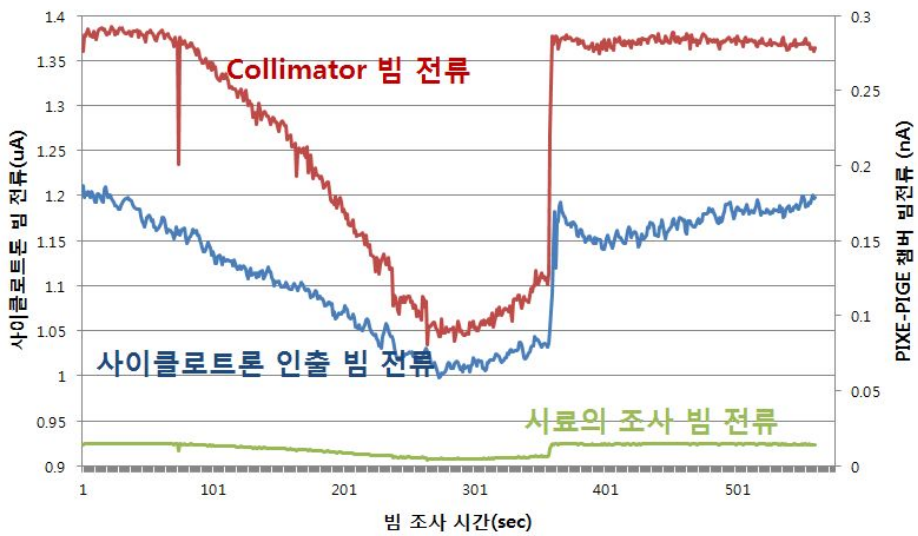


그림 76. 실리콘 고무 시료의 조사 빔 전류

그림 77은 암석시료에 빔을 조사한 후 빔의 흔적이 보이는 그림이다. PIXE-PIGE용 분석노즐의 지름이 5mm 로 빔의 크기도 노즐의 크기와 동일함을 보여주는 사진이다.



그림 77. 3.5 MeV 양성자 빔 조사 흔적이 있는 암석시료

3. PIXE 스펙트럼 분석

PIXE 분석에 있어서 얇은 시료의 경우에는 matrix에 관한 보정을 할 필요가 없으나 두꺼운 시료에 양성자를 조사시켜 얻은 각 원소별 특성 X-선의 계측수가 목적원소의 농도와 정확히 일치하기 위해서는 시료의 matrix를 보정해 주어야 한다. 만일 시료 matrix를 이루는 주요 성분들이 모두 X-선 스펙트럼 상에 나타나게 된다면 각 원소들의 특성 X-선 계측수와 농도와의 상관관계는 단순한 iteration 작업을 거쳐서 정확히 표현될 수 있다. 그러나 가벼운 원소들의 특성 X-선은 양성자에 대한 X-선 발생반응 단면적도 작을뿐더러 발생 X-선의 에너지도 매우 작기 때문에 수집된 X-선 스펙트럼 상에서는 누락되게 된다.

각 원소의 원자는 외부의 힘에 의해 흥분된 후 기저상태로 되돌아가면서 방출하는 특성 X-선을 나타낸다. PIXE 분석에서는 양성자 조사 시 시료에서 방출되는 X-선을 측정하는데 표 25의 데이터를 참고해서 원소를 구분할 수 있다.

표 25. 방사선 분석에 유용한 X-선 에너지

원소기호	X-ray Energy		
	K α	K' β_1	K' β_2
Li	0.05		
Mg	1.25		
Al	1.49		
Be	0.11		
Sc	4.09	4.46	
Ti	4.51	4.93	
V	4.95	5.43	
Mn	5.9	6.49	
Fe	6.4	7.06	
Co	6.93	7.65	
Ni	7.47	8.26	
Cu	8.03	8.91	
Zn	8.63	9.57	
Nb	16.6	18.6	19
Mo	17.4	19.6	20
Ru	19.2	21.6	22.1
Rh	20.2	22.7	23.2
Pd	21.1	23.8	24.3
Ag	22.1	24.9	25.5
In	24.1	27.3	27.9
Sn	25.1	28.4	29.1
La	33.3	37.8	38.7
Ce	34.5	39.3	40.2
Pr	35.9	40.7	41.8
Nd	37.2	42.3	43.3
Sm	39.8	45.4	46.6
Eu	41.3	47	48.2
Gd	42.7	48.7	49.9
Dy	45.6	52.1	53.4
Ho	47.1	53.8	55.3
Er	48.7	55.6	57.1
Lu	53.5	61.3	62.9
Hf	55.2	63.2	64.9
Ta	57.1	65.2	67
W	58.8	67.2	69.1
Re	60.6	69.3	71.2
Ir	64.3	73.6	75.6
Au	68.2	78	80.1
Pt	66.2	75.7	77.8
Pb	74.2	84.7	87.3

출처 : Ref. [10]

이와 같이 각 원소에서 방출되는 특성 X-선은 K_{α} X-선과 K_{β} X-선이 있다. 각 시료에 양성자를 조사하면서 얻은 X-선 스펙트럼은 이들 에너지와 비교를 통해 원소의 정보를 확인할 수 있다. 그러나 본 실험을 통해 확인할 수 있는 것은 4 keV 이하의 특성 X-선을 방출하는 원소는 원자번호가 20 이하의 원소로 PIXE 분석에서의 X-선 계수율이 낮아서 스펙트럼의 확인이 어려웠다. 한 가지 예로, 그림 78은 알루미늄 시료에 3.5 MeV 양성자를 조사하면서 얻은 스펙트럼이다. 스펙트럼 수집 시간은 10분이다. 알루미늄 시료의 경우 방출하는 KX-선 에너지는 1.49 keV 로 그림에서는 거의 백그라운드 수준으로 나타나지 않음을 알 수 있었다.

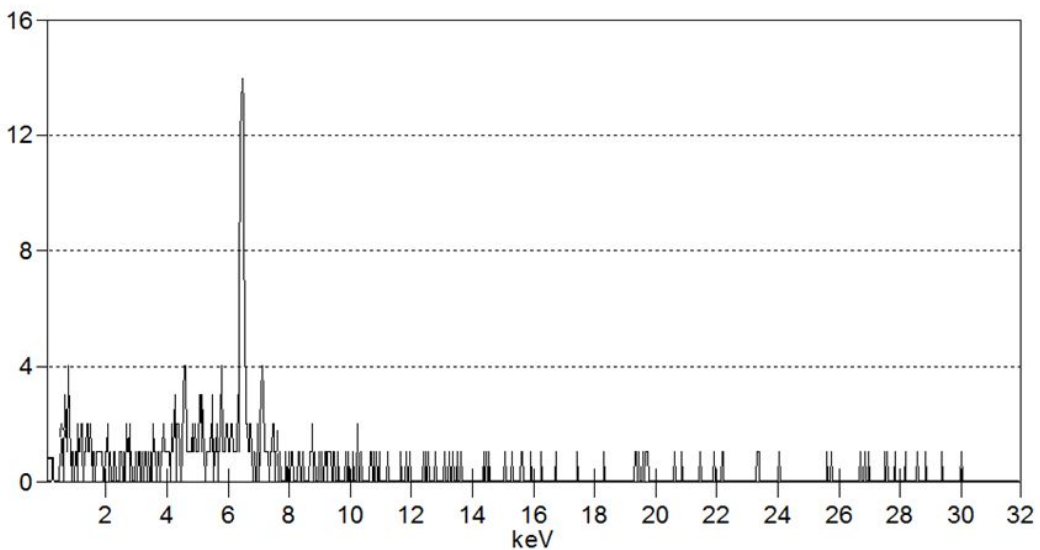


그림 78. Al 시료의 PIXE 스펙트럼

알루미늄 시료 계측 시 검출기의 불감시간은 약 50% 수준으로 알루미늄 분석을 위해서는 filter 등을 사용하여 검출기의 불감시간을 충분히 낮추고 실험을 수행해야 할 것으로 판단된다.

따라서 특성 X-선 에너지가 4 keV 보다 높은 원소를 이용하여 PIXE 분석을 수행하였다. 우선적으로 4.51 keV K_{α} X-선을 나타내는 Ti 시료와 17.4 keV K_{α} X-선을 보이는 Mo 시료를 이용하여 검출기의 에너지 교정을 하였다.

그림 79는 Ti 시료와 Mo 시료를 순서대로 측정된 스펙트럼이다. Ti을 500초 측정 후 표적을 Mo 시료로 교체 후 다시 500초 동안 3.5 MeV 양성자 빔을 조사한 스펙트럼이다. 이와 같이 스펙트럼을 수집한 다음 검출기의 에너지 교정을 수행하였다. 각각 4.51 keV에서의 Ti 피크와 Mo 피크인 17.4 keV에서의 K_{α} X-선과 19.6 keV에서의 K_{β} X-선이 뚜렷하게 관찰되고 있다.

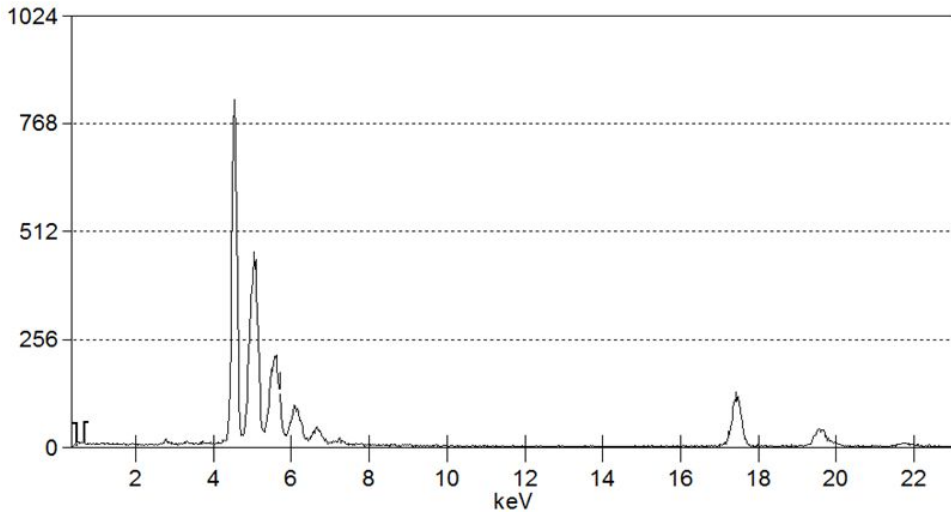


그림 79. Ti 시료와 Mo 시료의 PIXE 스펙트럼

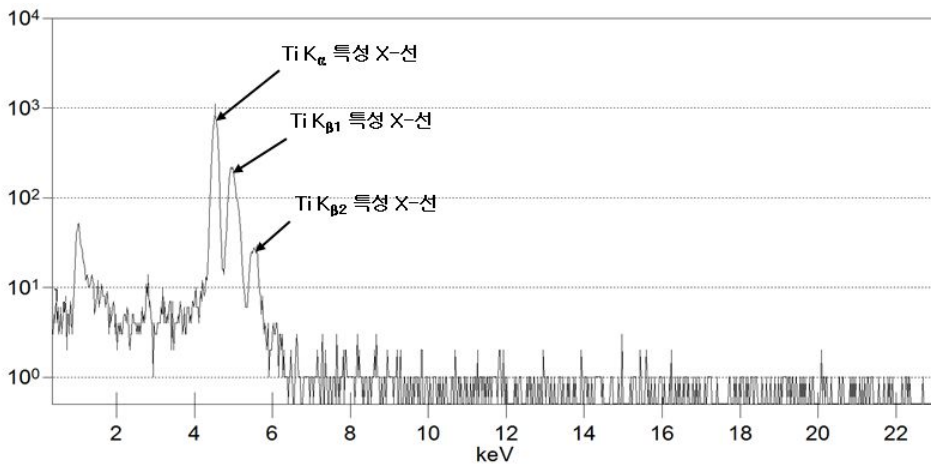


그림 80. Ti 시료의 PIXE 스펙트럼

이와 같이 검출기의 에너지 교정이 완료하고 단일원소 Ti 원소에 대하여 PIXE 분석을

수행하였다. 그림 80은 단일원소 박막 시료로 Ti 시료의 PIXE 스펙트럼으로 Ti 함량은 99% 이상이다. Ti 시료의 PIXE 스펙트럼에서는 K_{α} 및 K_{β} 특성 X-선이 명확하게 나타나 있다. 이는 PIXE 분석 실험을 통해 Ti 원자의 구조해석도 가능한 것으로 나타났다. 그림 81부터 그림 83까지는 대한민국 주화 시료에 3.5 MeV 양성자를 조사하여 수집한 X-선 스펙트럼이다.

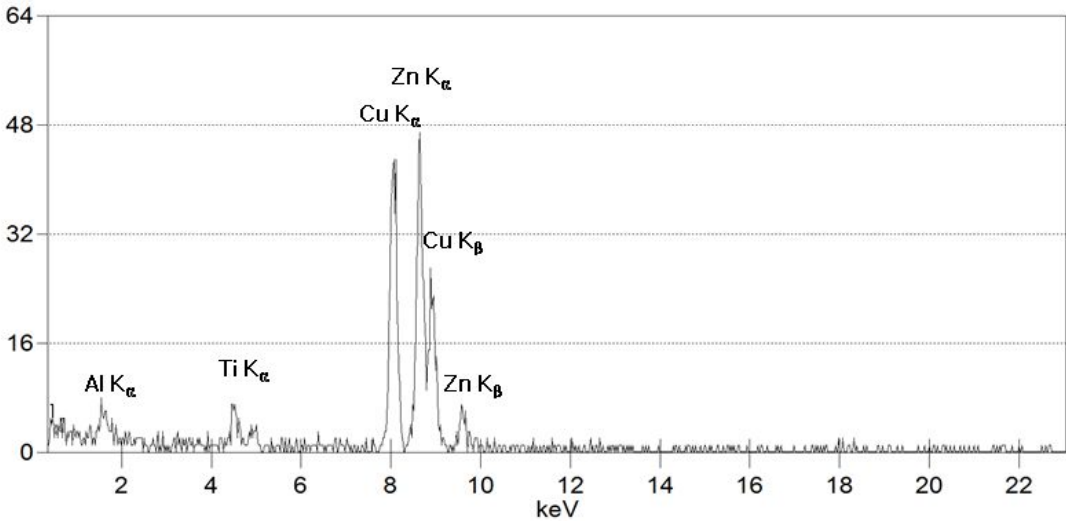


그림 81. 10원 주화의 PIXE 스펙트럼

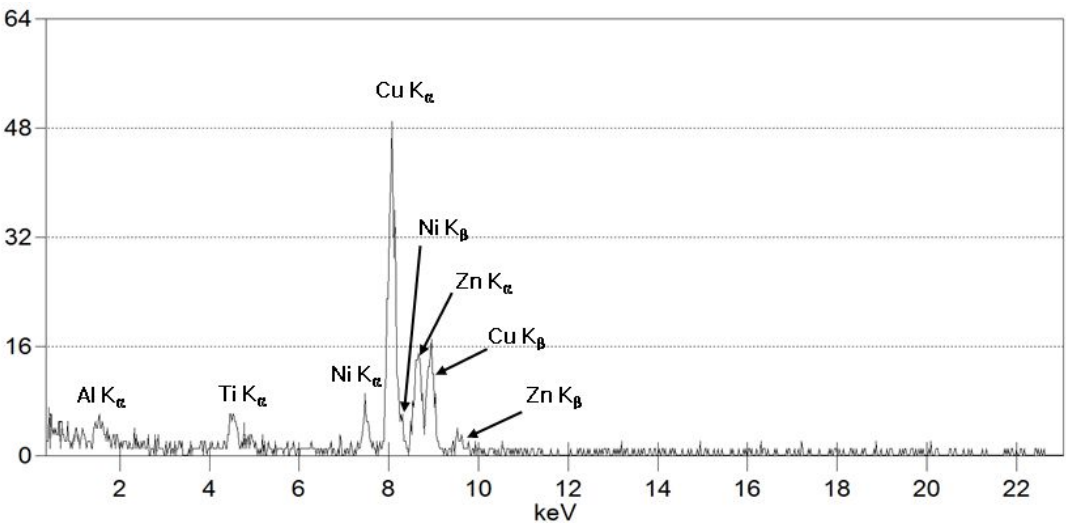


그림 82. 50원 주화의 PIXE 스펙트럼

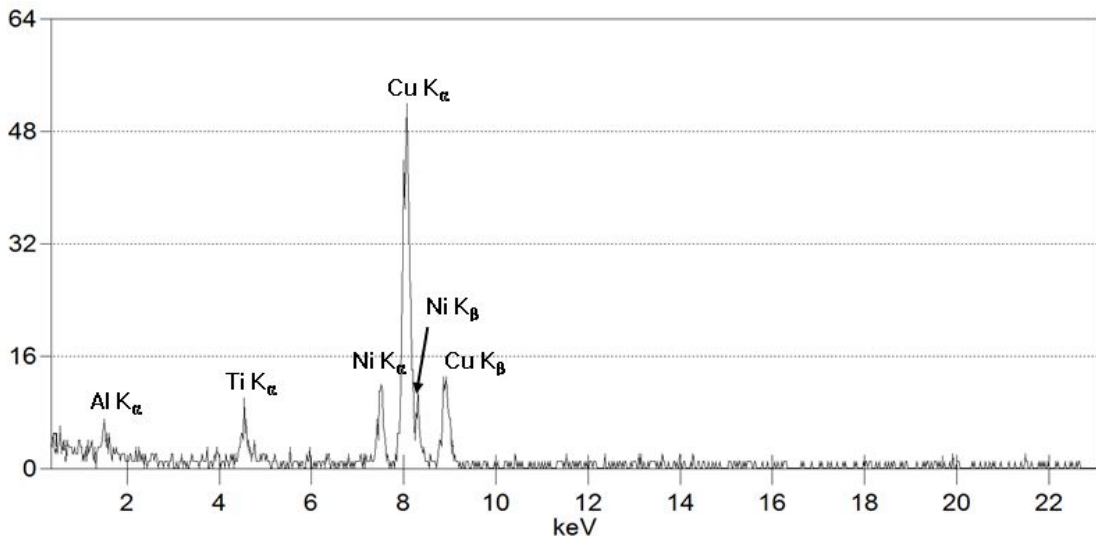


그림 83. 100원 주화의 PIXE 스펙트럼

10원 주화는 소재가 황동으로 주요 성분은 Cu 65%, Zn 35% 가 함유되어 있으며, 그림 81의 PIXE 스펙트럼 스펙트럼에서 8.03 keV 와 8.91 keV 특성 X-선 피크가 관찰된다. 10원 주화에서 Cu 다음으로 함유량이 많은 원소가 Zn 으로 함량은 35%가 함유되어 있어서 8.63 keV와 9.57 keV 에서의 피크가 관찰되었다.

50원 주화의 경우, 소재는 양백으로 성분은 Cu 70%, Zn 18%, Ni 12% 가 함유되어 있다. 그림 82에서 8.03 keV 에서 Cu 피크가 가장 높게 보이고, 다음으로 함유량이 높은 Zn 피크가 8.63 keV 에서 보인다. Ni 은 함유량이 가장 낮아서 피크도 가장 낮게 보인다. Ni 의 특성 X-선 에너지는 7.47 keV 와 8.26 keV 에서 나타난다.

100원 주화는 소재가 백동으로 Cu 75%, Ni 25% 로 구성되어 있다. 100원 주화의 소재와 성분은 500원 주화와 동일하여, 100원 주화와 500원 주화의 PIXE 스펙트럼은 거의 일치하였다. 본 논문에서는 100원 주화에 대한 PIXE 스펙트럼만 나타내었다. 그림 83은 100원 주화의 PIXE 스펙트럼이다. 100원 주화의 구성이 Cu 와 Ni 로 이루어져 있으므로 PIXE 스펙트럼에서도 이 두 가지의 피크가 관찰되었다. 8.03 keV 와 8.91 keV에서 Cu 의 피크가 나타나고, 7.47 keV 와 8.26 keV에서 Ni 의 피크가 나타났다. 이와 같이 피크의 높이, 즉 X-선 계수율과 시료내 원소의 함량과의 관계로부터 정량인자를

도출할 수 있다.

그림 84는 NIST SRM-987 시료로 암석시료 중의 스트론튬 원소분석에 사용되는 표준시료에 대한 PIXE 스펙트럼이다. 이 시료의 스트론튬 함량은 ^{88}Sr 82.58%, ^{87}Sr 7%, ^{86}Sr 9.9%, ^{84}Sr 0.6%의 존재비로 함유되어 있다. PIXE 스펙트럼에서는 스트론튬의 동위원소에 대한 정보는 확인할 수 없으며, 스트론튬 원소에 대한 특성 X-선을 확인할 수 있었다. 빔 조사용 표적장치에 Ti 시료와 Mo 시료를 암석시료와 함께 장착하고 각 시료별로 10분씩 빔을 조사하였다. X-선 스펙트럼 분석 프로그램으로 설정한 시료별 10분의 데이터 수집이 종료되면, 표적을 교체하고 기존의 분석 프로그램 상에 동일하게 추가하여 측정하는 방법으로 3 종류의 시료에 대한 특성 X-선 스펙트럼을 수집하였다. 스트론튬의 특성 X-선 에너지는 14.1 keV와 15.8 keV, 그리고 16.1 keV에 나타난다. 본 실험에서는 16.1 keV에서는 X-선 발생수율이 낮아서 15.8 keV의 피크의 영향으로 선명하게 나타나지 않은 것으로 보인다.

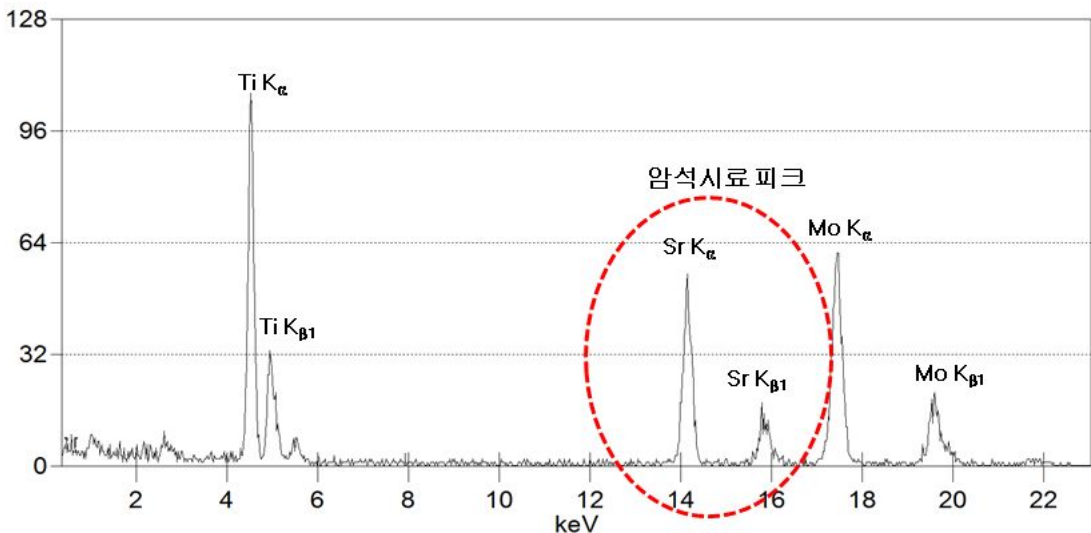


그림 84. SRM-987 암석 표준시료의 PIXE 스펙트럼

위에서 언급한 시료 이외에도 실험실 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 시료들에 대하여 PIXE 분석을 수행하였다. 그림 85는 간단한 실험용 용접에 사용되는 땀납 시료에 대한 X-선 스펙트럼이다. 을 수집하였다. 땀납은 용융점이 낮아서 쉽게 가공할 수 있어서

PIXE용 빔 조사 표적으로 적합하였다. 땀납의 성분으로는 주로 Sn 과 Pb 으로 이루어져 있으며, 전기 배선용으로 Sn 이 50%, Pb 가 50% 정도의 함유되어 있다. 그러나 PIXE 분석에서 Sn 의 특성 X-선의 에너지는 25.1 keV 이고 Pb 의 특성 X-선은 74.2 keV 이지만 Sn 의 특성 X-선 피크는 관찰되지 않는 것을 확인하였다. 대신 5 ~ 8 keV 영역의 피크들이 관찰되었다.

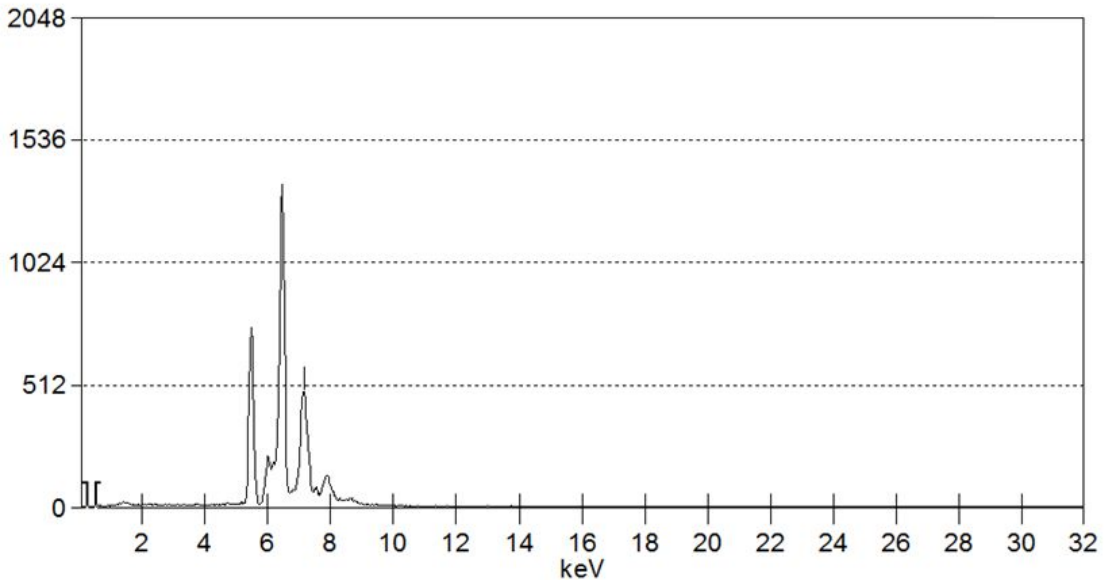


그림 85. 땀납 시료의 PIXE 스펙트럼

그림 85에서 5 ~ 8 keV 의 영역에 존재하는 원소들로 Mn, Fe, Co, Ni 등이 있으므로 필터의 사용 등 다양한 분석기법의 활용이 필요하다. 그림 86은 실험실에서 주로 미끄럼 방지나 액체질소 이송 관으로 사용하고 있는 실리콘 고무 시료에 3.5 MeV 양성자 빔을 조사하여 얻은 X-선 스펙트럼이다. 특이할 만한 피크가 관찰되지 않는다. Si 의 특성 X-선 피크는 1.74 keV 에서 확인되어야 하지만 약 0.9 keV 에서의 피크가 확인되었다. 따라서 Si 원소나 Al 원소와 같이 방출에너지가 매우 낮은 특성 X-선에 대한 분석 기법 마련이 필요하며, 이들은 Funny 필터 등을 사용하여 2차 전자 등이 검출기에 동시에 입사되어 백그라운드를 높이는 현상을 보이므로 이러한 분석방법들의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

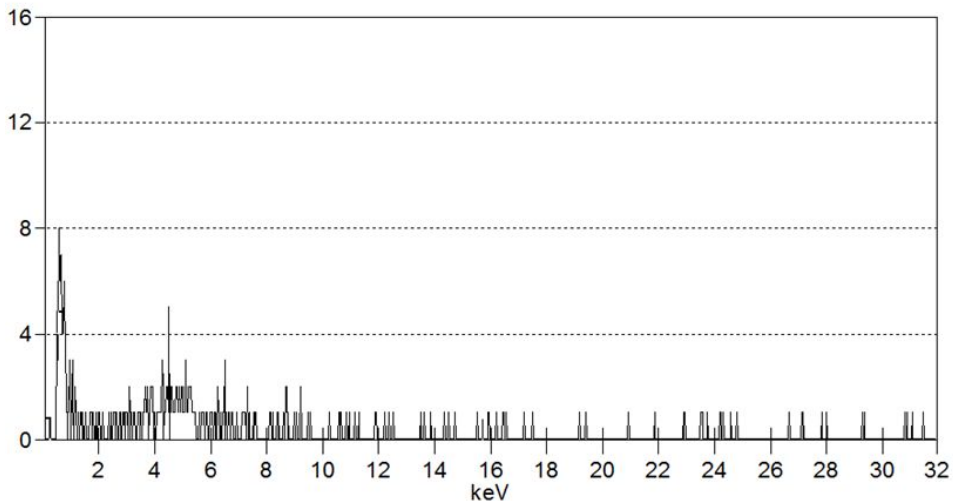


그림 86. 실리콘 시료의 PIXE 스펙트럼

그림 87과 그림 88은 한국기초과학지원연구원(KBSI)으로부터 지원 받은 암석시료이다. 이 시료들도 표준시료인 SRM-987보다 낮은 수준이지만 TIMS 장비를 이용하여 측정된 안정스트론튬의 동위원소 비가 알려진 시료들이다. 이들 각 시료에서도 미약하지만 14.1 keV에서 스트론튬의 특성 X-선 피크가 관찰되었다.

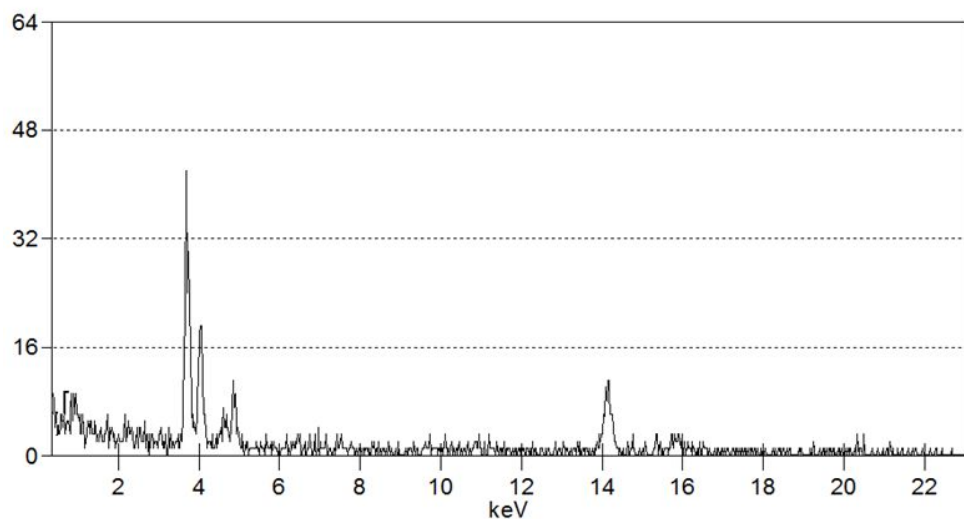


그림 87. J15-236 암석시료의 PIXE 스펙트럼

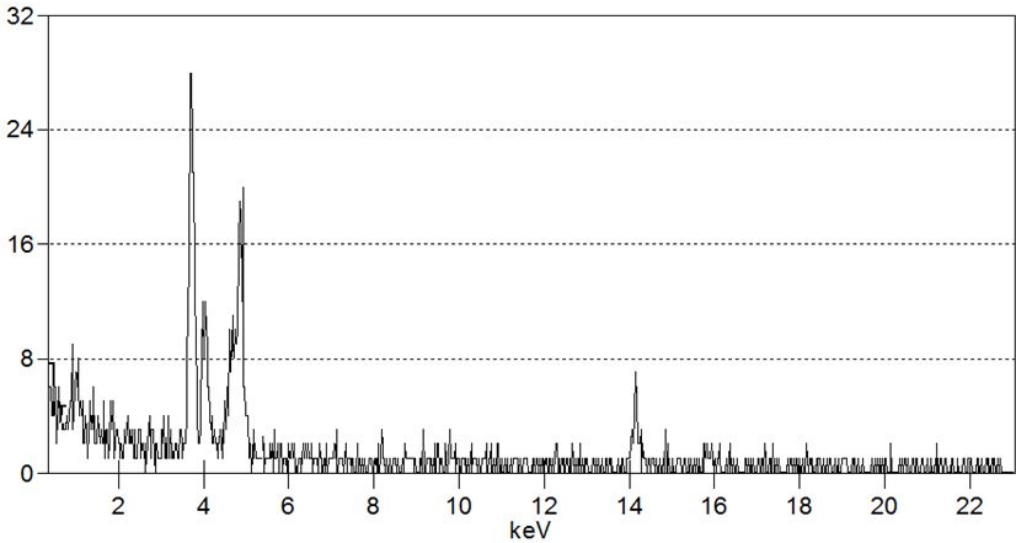


그림 88. J15-237 암석시료의 PIXE 스펙트럼

제 4 절 양성자-유도 감마선 방출 분석(PIGE) 실험

PIGE 분석법은 Li - P 에 이르는 원소들을 비파괴적으로 분석할 수 있는 매우 유용한 방법이다. 이 방법은 가속기를 이용한 가장 대표적인 분석법 중 하나인 PIXE 분석법을 보완하는 분석법으로서 PIXE 분석법이 Si 이상의 무거운 원소들의 분석에 유용한 것과 대별된다. 원리적으로는 PIXE 분석법과 매우 다른데, 즉 PIXE 분석법이 가속된 하전입자가 표적원소의 원자를 여기시켜 발생하는 특성 X-선을 측정하는 반면, PIGE 분석법은 표적원소의 원자핵을 여기시켜 발생하는 감마선을 측정하는 방법이다[11]. 한 가지 예로 본 실험에서 사용한 시료에 대한 원자핵 여기 준위를 그림 89에 제시하였다. 그림 89는 Al 시료와 Si 시료의 원자핵 여기준위를 나타내는 그림이다. 3.5 MeV 양성자가 Al 시료나 Si 시료에 조사되면 이들 원자핵은 각각 원자핵 준위가 여기되고 수십 ps 만에 안정된 상태로 떨어지면서 여기된 에너지만큼 감마선으로 방출된다. Al 시료의 경우 양성자 조사에 의해 843.8 keV, 1014.6 keV, 2212 keV 의 감마선 에너지가 방출되며 이렇게 방출된 감마선은 다중파고분석기를 통해서 관측된다. Si 시료의 경우에도 양성자가 시료에 입사되면, Si 의 원자핵은 여기 준위로 들뜬상태에서 곧바로 감마선을 방출하면서 안정된다.

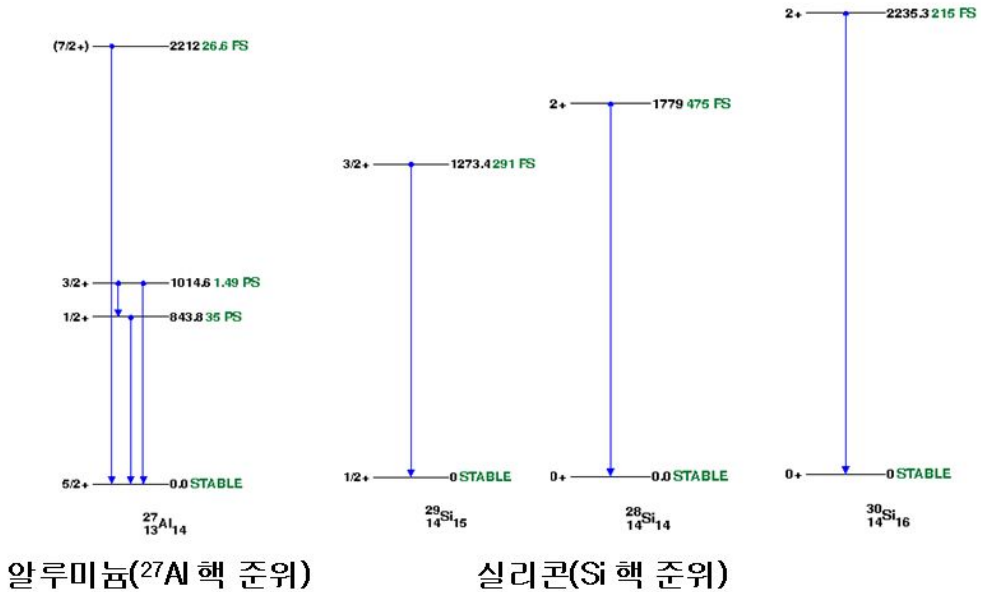


그림 89. 알루미늄과 실리콘 원자핵의 여기 준위

PIGE 분석의 경우 시료에 함유된 원자핵의 동위원소 비와 관계된다. PIXE 분석에서는 동위원소 비를 확인할 수 없으나, PIGE 분석에서는 시료에 함유된 원소의 동위원소 비와도 밀접한 관계가 있다.

일반적으로 MeV 급 하전입자는 중성자와는 반대로 쿨롱장벽이 상대적으로 낮은 경원소일수록 반응이 잘 일어난다. 따라서 PIGE 분석법을 이용하면 시료중의 경원소에 대하여 감도가 좋아지게 되나 PIXE의 경우와 같이 표적원자의 원자번호 증가에 따라 그 반응 단면적과 발생하는 광자의 에너지가 일관성 있게 증가 또는 감소하는 것이 아니고 개개의 복합핵의 에너지 준위의 형태에 따라 개개의 핵종별로 반응 단면적 및 감마선의 에너지가 큰 차이를 나타낸다[12].

PIGE 분석법도 PIXE 분석법과 마찬가지로 그 용도가 다양하여 지질이나 광물시료, 생체시료, 각종소재 및 환경시료 등에 광범위하게 응용되고 있다. 외국의 경우 PIXE 분석이나 PIGE 분석을 적절히 혼용하여 주기율표상의 대부분의 원소를 분석할 수 있는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 또한 고고학 시료 등 거대시료의 비파괴 분석을 위하여 external beam PIXE-PIGE 시스템을 구성한 경우도 있다[11]. 그러나 본 연구에서는 주로 실험장치의 구성 및 PIGE 분석을 통한 시료분석 등을 수행하였다.

1. 시료 준비

PIGE 분석법은 실용적으로 bulk 시료의 분석에 이용되지만 원리적으로는 표면에서 시료에 따라 수십 내지 수백 um 내 특정부위의 원소만을 정량할 수 있다. 따라서 시료의 균질성이 확보되어야만 분석의 신뢰도를 확보할 수 있다. 고전적인 X-선 분광분석법의 경우 균질성 확보에 뛰어난 용융 방법이 많이 사용되지만 PIGE의 경우 flux, 혹은 용재가 경원소를 포함하는 경우가 많기 때문에 이 방법의 사용이 용이하지 않으며 따라서 시료의 원상태가 불균일할 경우 주로 시료를 파쇄, 혼합한 후 펠렛화하여 사용하게 된다. PIGE의 경우는 감마선의 에너지가 크기 때문에 XRF (X-Ray Fluorescence) 나 PIXE 와 같이 시료표면의 거칠기가 지극히 중요하지 않다. 다시 말하면 입자의 크기는 크게 문제되지 않으며 시료의 균질성이 더 큰 문제이므로 입도를 고르게 하여 시료를 혼합 혹은 펠렛화 할 때 서로 다른 입자간의 변리 현상을 방지하는 것이 중요하다 [12]. 본 논문에서는 PIGE 분석 실험을 위하여 별도의 시료를 제작하지 않고, PIXE 분석에 사용한 시료를 그대로 사용하였다. 단지 양성자 빔 조사에 따른 PIGE 스펙트럼 수집을 위한 방사선 검출기로 감마선 검출기가 사용된다.

2. 양성자 빔 조사

PIGE 분석을 위한 양성자 조사는 PIXE 분석과 동일하게 수행되었다. PIGE 분석에 사용된 빔 전류량은 시료별 평균 13 pA 로 총누적 전하량은 7.8 nC 정도이다. 최종 표적에는 평균 0.013 nA가 입사되며 이는 사이클로트론의 0.0012% 수준이다. PIGE 분석에 사용된 시료는 PIXE 분석에 사용한 시료와 동일하다. PIXE 분석이 종료되면 이어서 PIGE 분석을 수행하는 순서로 실험을 진행하였다.

PIGE 분석 실험에 사용된 시료는 Ti, 10원 주화시료, 100원 주화시료, Stainless Steel, 실험실용 땀납, 그리고 실리콘 고무가 사용되었다. 이들 시료에 조사된 빔 전류량은 각각 0.014 nA, 0.013 nA, 0.013 nA, 0.013 nA, 0.013 nA, 0.011 nA 로 빔 조사 시간은 10분씩 조사하였다. 표 26은 각 시료별 PIGE 분석 시 조사된 빔 전류량 데이터를 정리하였다.

표 26. PIGE 분석 시료의 빔 조사량 데이터

시 료	빔 전류		
	사이클로트론	최종 Collimator	PIGE 표적
Ti 박막	1.165 uA (100%)	0.272 nA (0.023%) 0.272 nA (100%)	0.014 nA (0.0012%) 0.014 nA (5%)
10원 주화	1.121 uA (100%)	0.257 nA (0.023%) 0.257 nA (100%)	0.013 nA (0.0012%) 0.013 nA (5.1%)
100원 주화	1.140 uA (100%)	0.258 nA (0.023%) 0.258 nA (100%)	0.013 nA (0.0012%) 0.013 nA (5.1%)
Al 박막	1.149 uA (100%)	0.263 nA (0.023%) 0.263 nA (100%)	0.013 nA (0.0012%) 0.013 nA (5.1%)
실리콘 고무	1.119 uA (100%)	0.224 nA (0.021%) 0.224 nA (100%)	0.011 nA (0.001%) 0.011 nA (5.1%)

3. PIGE 스펙트럼 분석

그림 90은 Ti 시료의 PIGE 분석 스펙트럼이다. 983.5 keV에서의 피크가 보이는 것이 Ti의 핵 여기에 의한 감마선 피크이다. 이와 같이 Ti 원소의 경우 PIXE 분석 시에도 정확한 피크를 관찰할 있고, PIGE 분석에서도 확실한 피크 확인이 가능함을 알 수 있었다. Ti 시료에 대한 안정 동위원소 존재비를 보면, ^{46}Ti 이 8.0%, ^{47}Ti 이 7.3%, ^{48}Ti 이 73.8% 이다. 따라서 PIGE 스펙트럼 분석을 통해 PIGE 분석은 시료에 함유된 원소의 동위원소 존재비와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 원리를 통해서 PIXE 분석에 비해 보다 정확한 원자핵의 정보를 확인할 수 있다.

더불어 PIGE 분석에 사용된 Ti, Al, Mo 과 같은 시료들은 실험을 통해 얻어진 PIGE 스펙트럼에서 공통적으로 844 keV 에서 피크가 존재하는데, 이 피크는 Al 이 양성자에 의해서 핵 여기된 후 방출하는 감마선으로 분석된다. 이 Al 피크는 모든 시료에서 발견되는데, 이는 PIGE 챔버 의 재료가 Al 으로 제작되어 있어 양성자와의 반응에 의한 백그라운드로 작용하는 것을 알 수 있다. 여기에서 중요한 점은 Al 과 같이 PIXE 에서는 너무 낮은 에너지 방출에 의해 관찰되지 않았으나, PIGE 분석을 통해 시료에 함유

되어 있는 양을 추측할 수 있을 것으로 판단되어, PIGE 분석이 시과 같은 경원소 분석에 훨씬 유리함을 알 수 있었다.

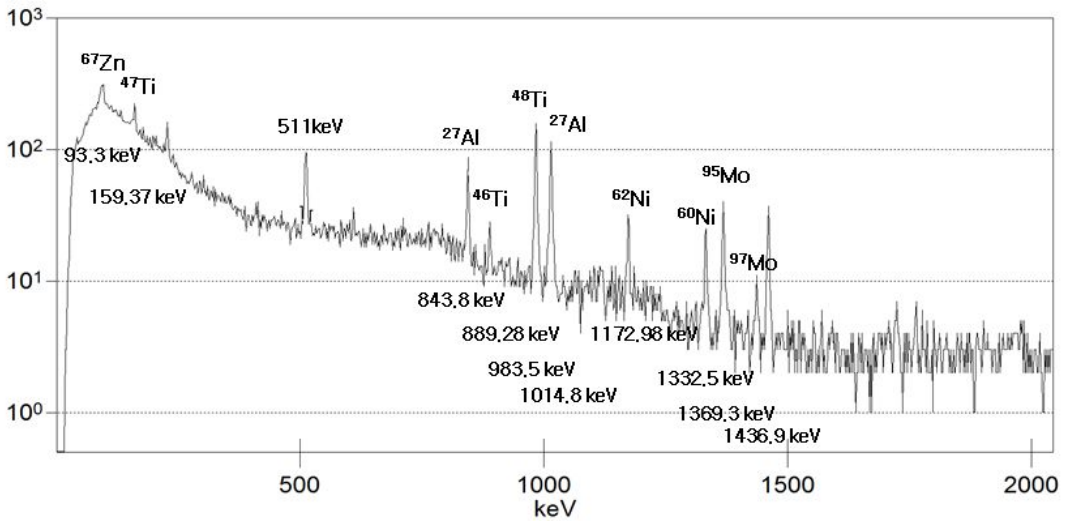


그림 90. Ti 시료의 PIGE 스펙트럼

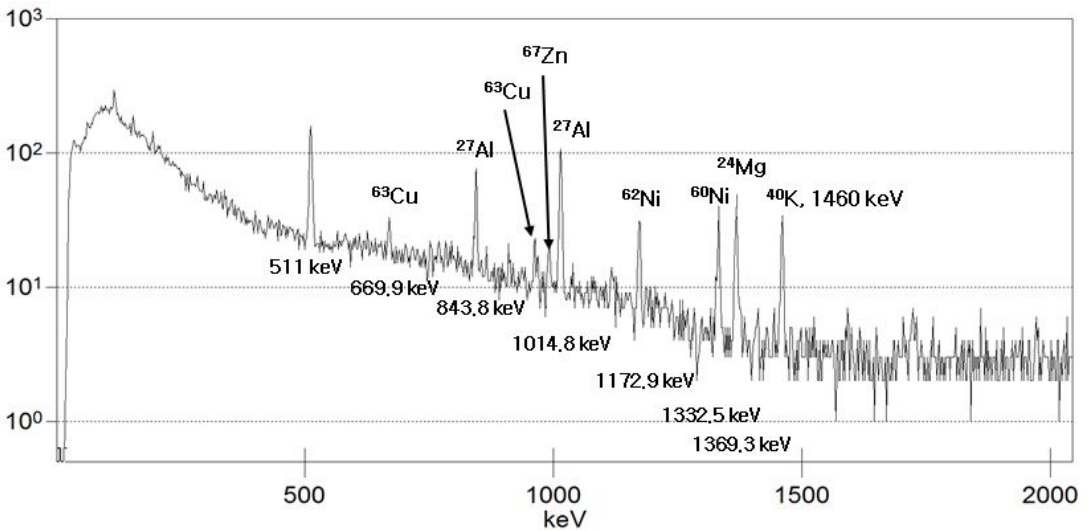


그림 91. 10원 주화의 PIGE 스펙트럼

그림 91은 대한민국 10원 주화시료에 대한 PIGE 분석 스펙트럼이다. 이 시료에 대한 스펙트럼을 살펴보면 10원 주화에 함유된 Cu 와 Zn 성분이 관찰된다. Cu 의 안정 동위

원소 존재비는 ^{63}Cu 69.17%, ^{65}Cu 30.83% 이다. 그러나 PIGE 스펙트럼에서, ^{63}Cu 에 대한 피크는 보이지만 ^{65}Cu 피크는 관찰되지 않는다.

그림 92는 100원 주화시료의 PIGE 스펙트럼이다. PIXE 분석에서와 마찬가지로 Cu 와 Ni 핵종의 에너지를 확인할 수 있다. 100원 주화시료의 스펙트럼에서도 ^{63}Cu 핵종에 대한 피크가 관찰되었다.

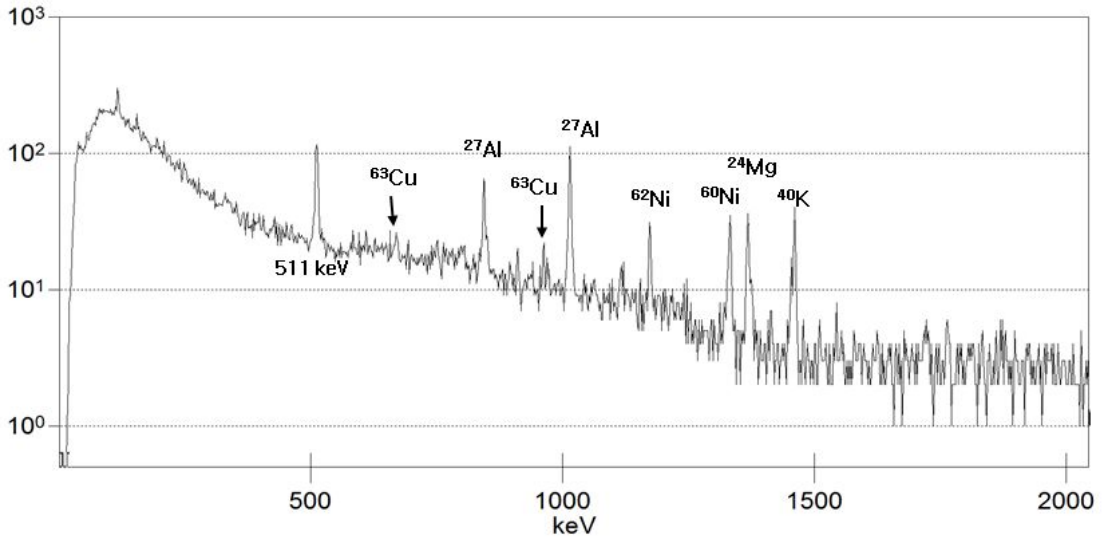


그림 92. 100원 주화의 PIGE 스펙트럼

그림 93은 Al 시료의 PIGE 분석 스펙트럼으로 843.8 keV 와 1014.8 keV 에너지에서 선명한 피크를 보인다. 알루미늄의 경우 PIXE 스펙트럼에서는 확인할 수 없는 원소로 분류되었다. 그림 94는 실리콘 고무 시료에 양성자를 조사하면서 수집한 PIGE 분석 스펙트럼이다. Al 시료와 마찬가지로 1799 keV 위치에 선명한 Si 에너지 피크가 관찰되었다. Si 원소는 Al 원소와 같이 PIXE 분석에서는 분석이 어려웠으나, PIGE 분석을 통해 확실한 피크를 확인할 수 있었다.

그림 95와 그림 96은 Al 시료와 Si 시료의 각각에 대한 PIXE 분석 스펙트럼과 PIGE 분석 스펙트럼을 비교한 그림이다. 분석결과, X-선 에너지가 4 keV 보다 낮은 경원소 즉, 원소의 주기율표에서 원자번호 20 이하의 원소에 대하여 PIXE 분석 스펙트럼에서 확인할 수 없었던 원소의 스펙트럼을 확인할 수 있었다. 이에 대하여 PIXE 분석에서

확인할 수 없는 원소는 PIGE 분석을 통해 확인할 수 있으므로, PIXE 분석법과 PIGE 분석법을 동시에 적용할 수 있는 PIXE-PIGE 연계분석이 필요할 것으로 판단된다.

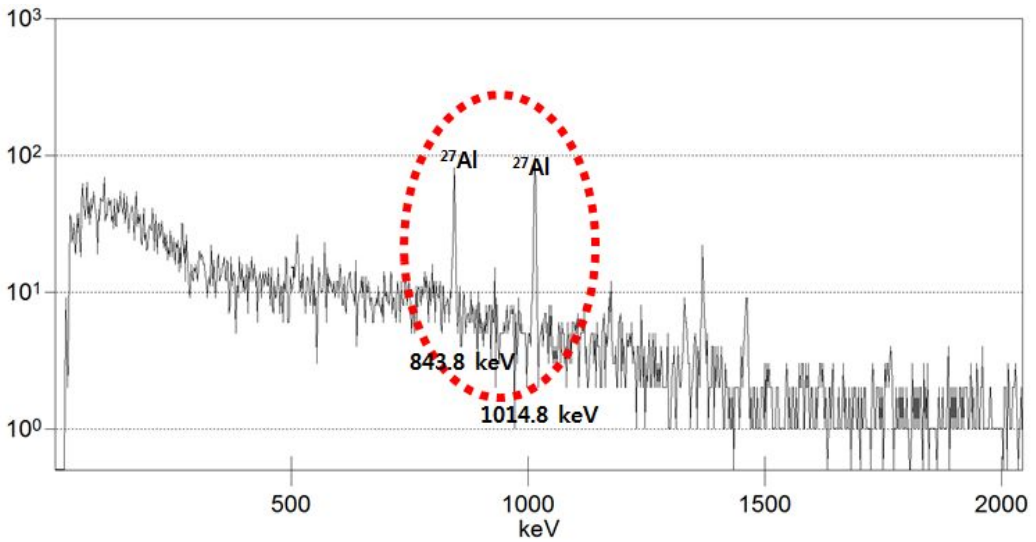


그림 93. Al 시료의 PIGE 스펙트럼

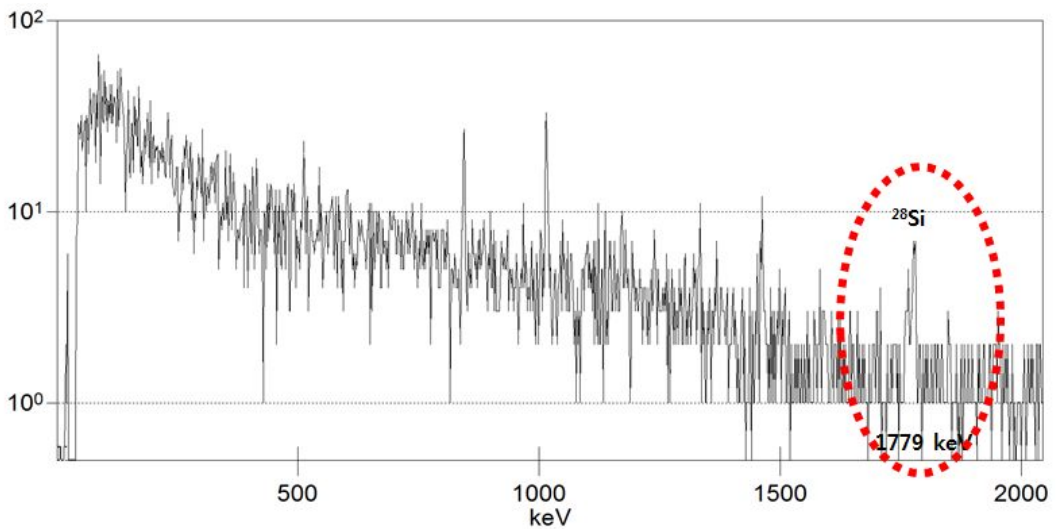


그림 94. 실리콘 고무 시료의 PIGE 스펙트럼

PIGE 분석 실험결과, 대체적으로 감마선 계수율이 낮게 측정되었다. 시료에 조사된

양성자의 빔 전류량이 수십 pA 수준이어서 정밀한 분석을 위해서는 수 nA 이상의 전류량이 필요할 것으로 판단된다. 이는 빔 수송계통의 구성품에 대한 위치 변경과 기체형 에너지 감속장치를 이용하여, 빔 에너지 감속 시 퍼진 빔의 상당량을 집속시키는 구조로 빔 수송라인을 변경하여 빔 전류량을 충분히 높일 필요가 있다.

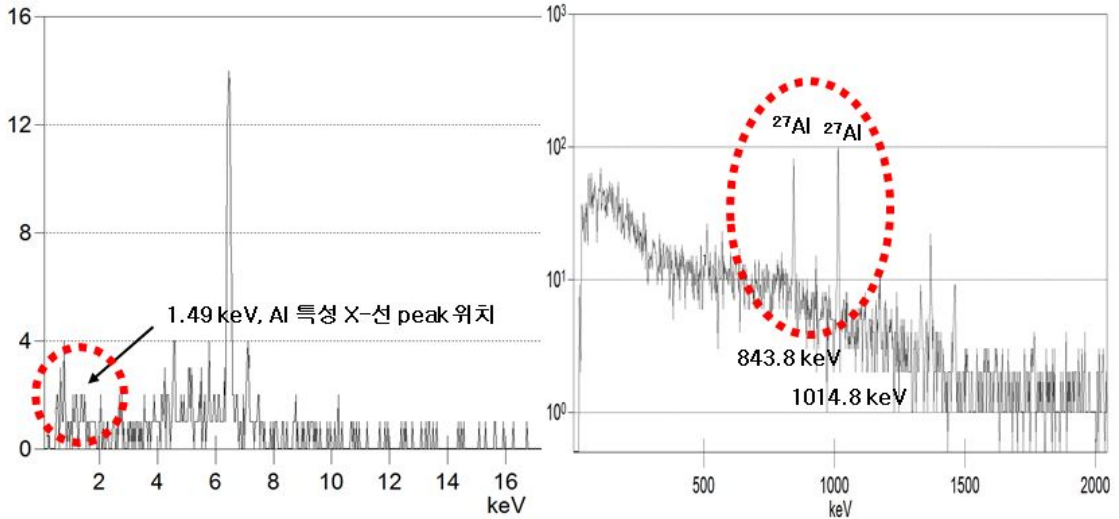


그림 95. 알루미늄 시료의 PIXE 스펙트럼 및 PIGE 스펙트럼 비교

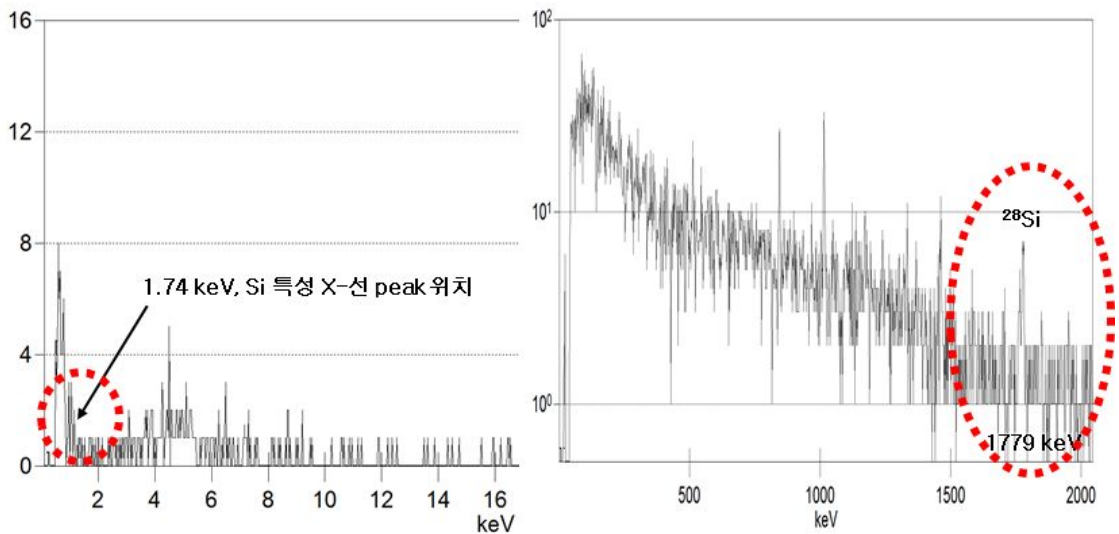


그림 96. 실리콘 시료의 PIXE 스펙트럼 및 PIGE 스펙트럼 비교

제 5 장 결 론

본 연구를 통해 KIRAMS-13 사이클로트론으로부터 인출된 13 MeV 양성자 빔의 에너지를 0 ~ 8 MeV 의 영역으로 감속시킨 후 빔을 직접 이송하여 PIXE, PIGE 등의 이온빔 정밀 분석을 수행할 수 있는 시스템을 설계하고 개발하였다.

동위원소 생산용 빔 인출과 이온빔 분석용 빔 수송을 위해 90도 횡용 전자석을 이용한 빔 수송계통을 설계하였다. 90도 횡용 전자석 가동 시에는 사이클로트론에서 인출된 빔은 이온빔 분석용 빔 수송계통으로 이송되며, 90도 횡용 전자석을 사용하지 않는 경우에는 사이클로트론에서 인출된 빔은 곧바로 동위원소 생산용 표적에 조사되도록 설계하여, 사이클로트론에서 인출된 양성자를 다양하게 활용할 수 있도록 하였다. 빔 수송라인에 사용된 90도 횡용 전자석은 2극 전자석 형식으로 사이클로트론에서 인출된 빔의 진행방향 결정 및 에너지 감속장치에 의해 감속된 빔의 에너지 선별 등 두 가지 기능을 갖도록 설계되었다. 이와 같이 설계·제작된 90도 횡용 전자석의 효율은 13 MeV 양성자를 제어할 수 있는 설계전류 60A 이하의 영역에서 98% 이상의 효율을 보여 최적의 상태로 제작되었으며, 집속용 4극 전자석의 효율은 설계 전류 40A 전체영역에서 82%의 안정된 효율을 보였다. 또한 빔 수송라인의 구성품으로 제작된 PIXE-PIGE 챔버는 이온빔 조사용 표적장치, X-선 검출기, 감마선 검출기, 그리고 빔 전류 측정을 위한 Faraday Cup 등을 설치할 수 있도록 설계되어 PIXE 및 PIGE 분석을 동시에 수행할 수 있도록 설계되었다. 특히, 빔 수송라인에 설치되는 구성품 중 13 MeV 양성자 에너지를 3 ~ 5 MeV 대역의 에너지로 감속하는데 사용되는 에너지 감속장치는 기체형과 고체형으로 설계·제작하였으며, 빔 인출 실험에는 흑연 박막의 두께를 변화시켜 양성자 에너지를 조절할 수 있도록 고체형 에너지 감속장치를 사용하였다. 본 논문에서는 0.25 mm 의 흑연박막을 사용한 경우 10.5 MeV 양성자 빔을 인출하였으며, 0.9 mm 의 흑연 박막을 사용한 경우에는 3.5 MeV 양성자 빔을 인출하였다.

사이클로트론을 이용하여 PIXE-PIGE 분석용 빔을 인출하기 위해 반드시 필요한 필수적인 요소가 가속기 제어 프로그램과 빔 수송라인 제어 프로그램이다. 본 연구에서는 가속기 제어 프로그램과 빔 수송라인 제어 프로그램을 각각 개발하여, 이를 통합시키기 위한 새로운 제어 시스템을 구축하고, 각각의 제어 프로그램을 통합하였다. 이와

같이 개발된 통합 제어 프로그램은 신규 장비 추가 시 프로그램 추가 및 확장이 간편하고, 원거리 통신 제어 방식을 채택하여 가속기 운전자와 이온빔 분석 장치와의 거리를 충분히 멀리 유지할 수 있도록 하였으며, 이는 이온빔 분석 시 발생하는 방사선원으로부터 실험자를 보호하는 목적으로 활용되었다.

10 MeV 대역의 양성자는 자연계에 존재하는 대부분의 원소에서 핵반응 반응단면적이 높아 양성자 방사화 분석(PAA)에 유용하며, 3 ~ 5 MeV 대역의 양성자는 PIXE 및 PIGE 분석과 같은 이온빔 분석에 유용하다. 이에 대해 조선대학교에 설치된 국산 사이클로트론으로부터 인출되는 양성자 빔 에너지는 13 MeV 이다. 따라서 본 논문에서는 사이클로트론에서 인출되는 13 MeV 양성자를 감속시키지 않고 그대로 인출하는 빔 인출 실험과 에너지 감속장치에 의해 감속된 PIXE 및 PIGE 분석용 3.5 MeV 양성자에 대한 빔 인출 실험을 수행하였다. 실험결과, 13 MeV 양성자의 경우 사이클로트론에서 인출된 빔은 PIXE-PIGE 챔버 까지 42.5% 가 수송되었고, 3.5 MeV 양성자의 경우에는 0.1% 가 수송되었다. 3.5 MeV 양성자는 이온빔 조사용 표적장치까지 1.2 nA 정도가 인출되어 사이클로트론 대비 0.02%를 보였다. 각각의 에너지에 대하여 인출된 양성자 양은 이온빔 분석 실험에 활용하는데 충분 양이었다.

사이클로트론으로부터 인출된 13 MeV 양성자 빔과 3.5 MeV 양성자 빔을 이용하여 3 종류의 이온빔 분석 실험을 수행하였다. 13 MeV 양성자 빔을 이용해서는 양성자 방사화 분석(PAA) 실험을 수행하였으며, 3.5 MeV 양성자 빔을 이용해서는 PIXE 분석 및 PIGE 분석 실험을 수행하였다. 13 MeV 양성자 빔을 이용한 양성자 방사화 분석(PAA) 실험에서는 암석 중 안정스트론튬의 동위원소 존재비를 측정하였다. 양성자 방사화 분석으로 측정한 안정스트론튬 동위원소 존재비는 열 이온화 질량분석기의 분석결과와 비교한 결과 $96.2 \pm 3.8\%$ 의 정확도를 나타냈다. 3.5 MeV 양성자 빔을 이용한 PIXE 분석 및 PIGE 분석 실험으로는 단일원소로 구성된 교정용 순수 박막시료와 대한민국 주화 시료, 그리고 실험실에서 주로 사용되는 소재 시료로 이들 시료에 포함되어 있는 원소분석을 수행하였다. 단일원소의 순수 박막시료에 대한 PIXE 분석실험을 통해 Ti 과 Mo 원소의 X-선 에너지 스펙트럼을 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 X-선 검출기의 에너지 교정에 적용하였다. 에너지 교정이 완료된 검출기를 이용하여 대한민국 주화 시료를 분석한 결과 각각의 주화 성분 및 함량에 대한 스펙트럼을 확인하였다. PIGE 분석 실험의 경우 시료는 PIXE 분석과 동일하게 사용하였으며, 양성자 입사에 따

른 시료의 감마선 분석결과, X-선 에너지가 4 keV 보다 낮은 경원소 즉, 원소의 주기율표에서 원자번호 20 이하의 원소에 대하여 PIXE 분석 스펙트럼에서 확인할 수 없었던 원소의 스펙트럼을 보다 정확하게 확인함으로써, PIXE-PIGE 연계분석에 대한 필요성을 확인할 수 있었다.

결과적으로 본 연구를 통해서 개발된 이온빔 분석 시스템은 양성자 방사화 분석(PAA)을 이용한 암석 중 동위원소 존재비 측정을 통해 지질학적 이용 분야에 활용 가능할 것이며, 또한 PIXE 및 PIGE 분석 기법을 활용한 시료 중 미량원소 분석을 통해 향후 고고학적 활용 및 문화재 감정 등의 분야에 대한 활용 가능성을 확인하였다. 한편, 본 논문에서 설계한 기체형 에너지 감속장치에 대한 실증 실험 등 향후 후속 연구를 통해 양성자의 빔 인출 전류를 현재 수준보다 월등히 높은 수 십 nA 수준까지 높인다면 세계적 수준의 정밀한 미량원소 분석이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] K. Janssens, R. Van Grieken, Non-destructive microanalysis of cultural heritage materials, Volume XLII (2004).
- [2] Proceedings of the Third International Conference on PIXE and its Analytical Applications, Nucl. Instr. & Meth., 133 (1984).
- [3] 정인수, 동위원소 생산용 30 MeV 사이클로트론 고주파시스템 설계, 박사학위논문 (2011).
- [4] 한국지질자원연구원 연구보고서, PIXE 분석법 연구, KR-89-7B-5 (1989).
- [5] Sae-Hoon Park and Yu-Seok Kim, Characterization of the Beam Profile for the PIXE/PIGE Beam Line at the CRC Proton Cyclotron, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 63, No. 7, 1291-1295 (2013).
- [6] P.J. Baryant, Agile, a tool for interactive lattice design, Proceedings of EPAC, Vienna, Austria (2000).
- [7] 정철기, 이경진, 조선대학교 사이클로트론 연구센터의 KIRAMS-13 사이클로트론을 이용한 이온 빔 분석용 빔 라인 설계연구, 대한방사선방어학회 2011년도 추계 학술발표회 및 심포지엄, (2011).
- [8] S. Agostinelli, et al., GEANT4 - a simulation toolkit, Nucl. Instr. & Meth., A 506, 250-303 (2003).
- [9] 한국지질자원연구원 연구보고서, PIXE 분석법 연구, KR-90-3C-4 (1990).
- [10] Bernard Shleien, Pharm, D. Certified Health Physicist, ABHP FAPHA, The Health Physics and Radiological Health Handbook, Scinta, Inc. (1992).
- [11] 한국지질자원연구원 연구보고서, PIGE 분석법 연구, KR-93-3C-1 (1993).
- [12] 한국지질자원연구원 연구보고서, PIGE 분석법 연구, KR-94(C) 3-1 (1994).

감사의 글

박사과정 11년, 짧지 않은 시간동안 저에게 많은 관심과 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 저를 지금의 위치에 서있게 해 주신 이경진 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님께서 저를 입자 가속기라는 분야에 처음으로 발을 내딛게 하시어, 새로운 분야에 대한 연구에 전념할 수 있도록 해 주셨습니다. 그 결과 의료용 사이클로트론을 이용한 이온빔 분석 장치를 개발하게 되었습니다. 또한 교수님은 학문뿐만 아니라 다양한 분야에 대한 경험과 지식을 모두 전수해 주심으로 진정한 스승님의 상을 보여주셨습니다. 스승님께서 베풀어주신 은혜를 이 좁은 지면에 표현하기란 턱없이 부족하므로 스승님에 대한 감사의 마음은 평생 제 가슴깊이 새기고 살아가도록 하겠습니다.

학위과정 중 가속기에 대해 특별한 애정을 갖고 아낌없는 격려와 칭찬을 해 주신 정운관 교수님, 논문의 전체적인 틀을 잡아주시고 세심하게 지도해 주신 송종순 교수님, 가속기의 빔 에미턴스 측정 실험을 도와주시고 이에 대한 논문 내용을 꼼꼼히 지도해 주신 김유석 교수님, 논문의 연구결과에 대한 활용방안 및 향후 연구방향 등에 대한 섬세한 지도를 해 주신 김근범 박사님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 가속기 제어 프로그램 개발과정에서 프로그램의 기틀을 잡아주신 한국원자력학원의 장홍석 형님을 비롯하여, 논문 작성 과정에서 영어 번역과 GEANT4 프로그램 시뮬레이션 등을 본인 일처럼 도와준 김창혁 박사와 임희중 박사, 그리고 한가람 박사에게 진심으로 감사드립니다. 아울러 학위과정 중 연구의 끈을 놓지 않도록 항상 마음으로 응원해 주시고 격려해 주신 원자력공학과 나만균 교수님, 김진원 교수님께도 감사드립니다.

즐겁고 행복한 마음으로 논문작성에 전념할 수 있도록 음악으로 힘을 주신 백악 플루트 노진자 선생님을 비롯하여 김종일 교수님, 조학행 교수님, 범맹자 선생님, 박순철 교수님, 최창원 선생님, 조인욱 누나께 감사의 마음을 전합니다. 특히 논문이 마무리되기까지 세심하게 도와주신 백악 플루트 단원 김현 박사님께 진심으로 감사드립니다. 아울러 항상 따뜻하게 격려해주고 응원해 주신 노국향 누나, 김라영, 박미정 동생에게도 감사를 드립니다. 저에 대한 사랑을 항상 두 배로 보여주는 김두배 동생과 뇌출혈

로 힘들었지만 이겨내고 건강하게 지내고 있는 든든한 최우용 동생이 있어 보다 행복한 학위과정을 보내지 않았나 싶습니다. 그리고 지난 10년 동안 연구실에서 저의 든든한 버팀목이 되어준 김대석 연구원과 이현 연구원에게도 진심으로 감사드립니다.

지금까지 논문 쓰다, 일 한다, 하면서 잘 챙겨주지 못했던 두 딸과 아내에게 미안함과 고마운 마음을 전하며, 박사학위 취득을 진심으로 축하해주는 형님과 다섯 누나들에게 감사의 마음을 전합니다. 끝으로 아들의 박사학위를 기다리시다가 끝내 못 보고 돌아가신 부모님 영전에 이 논문을 바칩니다.